



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de Ingeniería Mecánica

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

***“Análisis de las características mecánicas
de la superplasticidad: aplicación a la
aleación de PbSn60”***

Autor: ROBERTO ESTÉBANEZ RAMOS

Tutor: JUAN CARLOS GARCÍA PRADA

Co-Tutor: GILLO GIULIANO

Università degli Studi di Cassino



ÍNDICE

1. OBJETIVOS	10
2. INTRODUCCIÓN.....	11
3. SUPERPLASTICIDAD	13
3.1 REQUERIMIENTOS PARA LA SUPERPLASTICIDAD	13
3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES SUPERPLÁSTICOS	14
3.2.1 <i>Comportamiento Mecánico: Ecuaciones constitutivas termomecánicas</i>	<i>17</i>
3.2.2 <i>Observaciones microestructurales</i>	<i>20</i>
3.3 PROCESOS SPF	22
3.3.1 <i>Procesos de conformado. Herramientas</i>	<i>32</i>
3.3.2 <i>Equipos de conformado.....</i>	<i>32</i>
3.3.3 <i>Materiales de los útiles de conformado</i>	<i>33</i>
3.3.4 <i>Características de reducción del espesor</i>	<i>35</i>
3.3.4.1 <i>Control de la reducción de espesores</i>	<i>35</i>
3.3.5 <i>Perfil de presiones.....</i>	<i>40</i>
3.3.6 <i>Cavitación y control de la cavitación</i>	<i>40</i>
3.3.7 <i>Resumen y conclusiones.....</i>	<i>42</i>
3.4 APLICACIONES.....	43
3.4.1 <i>Utilización industrial de los materiales superplásticos</i>	<i>44</i>
3.4.2 <i>Características de los materiales superplásticos y nuevas aplicaciones.....</i>	<i>46</i>
3.4.3 <i>Aplicaciones del conformado superplástico en aero motores</i>	<i>46</i>
3.5 VENTAJAS FRENTE A LAS ALTERNATIVAS TRADICIONALES	49
4. ALEACIONES SUPERPLÁSTICAS	51
4.1 ALEACIONES PbSn	53
5. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	55
5.1 HISTORIA DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	55
5.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	55
5.3 ESTRUCTURA Y FUNCIONES DE UN PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS ...	58
6. SOFTWARE MARC MENTAT	60
6.1 EJEMPLOS DE APLICACIÓN	60
6.1.1 <i>EJEMPLO 1: Análisis elástico lineal estructura 3D.....</i>	<i>60</i>
6.1.2 <i>EJEMPLO 2: Punzonado.....</i>	<i>88</i>



7.	ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60	113
7.1	ANÁLISIS EXPERIMENTAL	114
7.1.1	<i>Puesto de conformado</i>	<i>115</i>
7.1.2	<i>Equipos.....</i>	<i>117</i>
7.1.2.1	Molde	117
7.1.2.2	Termopar.....	120
7.1.2.3	Bandas calefactoras	122
7.1.2.4	Compresor	123
7.1.2.5	Multímetro	124
7.1.2.6	Válvula proporcional y generador	125
7.1.2.7	Generador de tensión variable.....	127
7.1.2.8	Láser	128
7.1.2.8.1	Regresión lineal.....	129
7.1.3	<i>Sistemas de control</i>	<i>130</i>
7.1.4	<i>Preparación de las láminas</i>	<i>131</i>
7.1.4.1	Laminador	133
7.1.5	<i>Caracterización mecánica de la aleación PbSn60.....</i>	<i>134</i>
7.1.6	<i>Resultados.....</i>	<i>141</i>
7.2	ANÁLISIS NUMÉRICO	147
7.2.1	<i>Resultados.....</i>	<i>171</i>
7.2.1.1	Otros resultados.....	175
7.2.2	<i>Efecto de la geometría del molde.....</i>	<i>179</i>
7.3	ANÁLISIS COMPARATIVO EXPERIMENTAL-NUMÉRICO.....	184
7.3.1	<i>Análisis de errores.....</i>	<i>187</i>
8.	CONCLUSIONES.....	189
9.	BIBLIOGRAFIA.....	192

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Deformación frente a velocidad de deformación inicial para una aleación de Zn-22Al común con tamaño de grano de 2.5 μm ensayada a temperaturas de entre 423 a 503K	14
Figura 2. Tensión vs. Velocidad de deformación para Ti-6Al-4V a 927 ° C.....	15
Figura 3. m vs. Velocidad de deformación para el Ti-6Al-4V a 927 °C. Esta curva corresponde a los datos mostrados en la Figura 2	15
Figura 4. Elongación para una serie de aleaciones	16
Figura 5. Elongación como función de la temperatura por encima de un rango de temperaturas incluyendo deformaciones superplásticas, para la aleación de Ti-6Al-4V ensayada a una velocidad de deformación de 8.3×10^{-4}	17
Figura 6. Efectos que influyen en las relaciones σ - $\dot{\epsilon}$ - ϵ	18
Figura 7. Efecto de la temperatura en el intervalo de transición del comportamiento plástico al comportamiento superplástico	19
Figura 8. Ilustración de la técnica de Blow Forming para conformado superplástico. La secuencia de a. a la d. indica la progresión del conformado con el tiempo	24
Figura 9. Métodos de sellado con láminas (superplastic sheet), para proporcionar una presión de sellado adecuada para contener el gas en el conformado. Secciones superior e intermedia utilizan zonas de sellado, ya presentes en la herramienta (seal beds), y en la inferior se muestra el uso de un marco superplástico usado como junta blanda (gasket).....	24
Figura 10. Estructura de un avión que fue rediseñado (redesigned frame) de una configuración tradicional (current frame) a una adecuada para el conformado superplástico y que usara menos piezas y elementos de fijación. La pieza fue fabricada de Ti-6Al-4V.....	25
Figura 11 Ejemplos de termo conformado usados en el conformado superplástico implicando: a. Conformado asistido por corriente en una cavidad de un molde hembra y b. Conformado “snap back” sobre un molde macho que es movido hacia la lámina	26
Figura 12 Métodos de termo conformado que emplean gas a presión y herramientas móviles para producir piezas a partir de aleaciones superplásticas. Tanto los moldes móviles macho como hembra han sido empleados de la manera mostrada en la imagen	27
Figura 13. Esquema de la preparación del punzón para un proceso de embutición de una lámina superplástica. Así mismo, se muestran los perfiles de disminución del espesor resultantes de una embutición con un contramolde de sujeción de la lámina.....	28
Figura 14. Representación de la sección transversal de un proceso combinado de SPF con difusión de uniones SPF/DB. El proceso mostrado utiliza detalles pre colocados a los que el material superplástico se une.....	29
Figura 15. Ilustración del proceso SPF/DB para piezas de dos láminas	30
Figura 16. Ilustración del proceso de SPF/DB para piezas con 3 láminas	31
Figura 17. Ejemplo de un proceso de SPF/DB para una pieza de 4 láminas en el cual las láminas externas son conformadas primero, después se conforman las láminas centrales y finalmente se unen por difusión de uniones a las otras dos láminas externas.....	32
Figura 18. Aparatos para termo conformado de láminas de materiales superplásticos usando un molde convexo para controlar el adelgazamiento, en forma de “sombbrero”	37
Figura 19. Aparatos para termo conformado de láminas de materiales superplásticos usando un molde cóncavo para controlar el adelgazamiento, en forma de “sombbrero”	37



Figura 20. Deformaciones (a) y perfil de espesores (b) para una configuración de “sombbrero” con un molde convexo como el de la Figura 18.....	38
Figura 21 Deformaciones (a) y perfil de espesores (b) para una configuración de “sombbrero” con un molde cóncavo como el de la Figura 19.....	39
Figura 22. Boceto del concepto de conformado de una lámina de un material que ya posee un perfil de espesores antes del conformado	40
Figura 23. Desarrollo de la cavitación con deformación por tracción uniaxial en una aleación de Al 7475 deformada a 516 °C bajo una velocidad de deformación constante de $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$	41
Figura 24. Efecto de la presión hidrostática en la eliminación de la cavitación en la aleación superplástica de Al7475, deformada a 516 °C.....	42
Figura 25. Elementos fabricados mediante conformado superplástico: a) carrocería en aluminio, b) cubierta de sensor, c) cubierta central del cono, d) escudo térmico cruzado	44
Figura 26. Cuotas porcentuales para algunos sectores de mercado de productos superplásticos	46
Figura 27. Partes de un motor de un avión donde existe la posibilidad de utilizar materiales superplásticos.....	47
Figura 28. Anillo de entrada, conducto de entrada de aire (TP400) y paneles góndola.....	47
Figura 29. Conducto compresor de tratamiento de aire caliente	47
Figura 30. Cono de escape de TiAL (RR BR715).....	48
Figura 31. Aspas de ventilador y componente de tubería	48
Figura 32. Algunos diseños preliminares	49
Figura 33. Configuración geométrica del problema	60
Figura 34. Menú creación del mallado	61
Figura 35. Creación del mallado. Uso del comando grid	62
Figura 36. Menú creación del mallado. Añadir puntos.....	63
Figura 37. Creación de Superficies	64
Figura 38. Conversión de las superficies en elementos	64
Figura 39. Empleo del comando SWEEP para fusionar los nodos duplicados.	65
Figura 40. Renumeración de los nodos	66
Figura 41. Eliminación de los elementos originales	66
Figura 42. Eliminación de los nodos no usados y sucesiva renumeración con el comando RENUMBER.....	67
Figura 43. Opciones de visualización	68
Figura 44. Opciones de visualización. Definición de los incrementos de rotación del modelo ..	68
Figura 45. Rotaciones del modelo	69
Figura 46. Desactivación de la visualización de ciertos elementos.	70
Figura 47. Condiciones de contorno	70
Figura 48. Restricción de desplazamientos imponiendo las condiciones de contorno.....	71
Figura 49. Condiciones de contorno mecánicas.....	72
Figura 50. Condiciones de contorno. Imposición de la carga de superficie (face load)	72
Figura 51. Carga de superficie aplicada sobre una cara de la pieza.....	73



Figura 52. Opción mostrar condiciones de contorno	74
Figura 53. Imposición de las propiedades del material.....	74
Figura 54. Imposición propiedades material. Introducción de propiedades isotropas.....	75
Figura 55. Imposición propiedades geométricas	76
Figura 56. Propiedades geométricas, sólido 3D	76
Figura 57. Menú principal del comando JOBS.....	77
Figura 58. Menú JOBS, MECHANICAL	78
Figura 59. Selección de variable de salida del programa	78
Figura 60. Condiciones de contorno activas y ordenadas	79
Figura 61. Tipo de elemento	80
Figura 62. Menú Jobs, ventana de lanzamiento del caso.....	80
Figura 63. Apertura del archivo de resultados desde el menú de post procesado.....	81
Figura 64. Selección de la variable de salida a mostrar	82
Figura 65. Tensión equivalente	82
Figura 66. Parámetros de la estructura deformada 1	83
Figura 67. Parámetros de la estructura deformada 2	83
Figura 68. Configuración de gráficos	84
Figura 69. Archivo de resultados. Planos transversales	85
Figura 70. Graficar los resultados en un camino de nodos predeterminado	85
Figura 71. Representación de la tensión en el camino de nodos seleccionado	86
Figura 72. Postprocesado. Resultados con vectores de desplazamiento	87
Figura 73. Parámetros de configuración en el postprocesado	87
Figura 74. Elementos del problema	89
Figura 75. Dimensiones del Punzón, pieza, y plato de soporte.....	90
Figura 76. La curva de endurecimiento del material.....	91
Figura 77. Resultado tras aplicar el comando CONVERT	93
Figura 78. Parte esférica del punzón	96
Figura 79. Geometría del punzón.....	97
Figura 80. Punzón, pieza y plato soporte.....	98
Figura 81. Curva de endurecimiento (Curva tensión-deformación)	100
Figura 82. Condiciones de contorno	101
Figura 83. Definición incorrecta de la dirección de las curvas en el plato soporte	103
Figura 84. Definición correcta de las curvas	104
Figura 85. Velocidad en función del tiempo	105
Figura 86. Especificación del time step y el número de incrementos	107
Figura 87. Especificación de la separación del contacto entre cuerpos.....	108
Figura 88. Selección de las opciones del caso	109
Figura 89. Análisis del caso completado.....	109



Figura 90. Selección de variables a grabar en el archivo de post resultados	111
Figura 91. Deformaciones y tensiones tras la recuperación elástica.....	111
Figura 92. Tensión total plástica equivalente tras la recuperación elástica.....	112
Figura 93. Esquema de la planta de conformado	116
Figura 94. Puesto de conformado	116
Figura 95. Molde circular	117
Figura 96. Parte inferior del molde	118
Figura 97. Parte superior del molde	119
Figura 98. Molde ensamblado.....	119
Figura 99. Lámina de ensayo después del conformado. Vista superior	120
Figura 100. Lámina de ensayo después del conformado. Vista frontal	120
Figura 101. Termopar.....	121
Figura 102. Bandas calefactoras.....	122
Figura 103. Molde preparado para el conformado superplástico	123
Figura 104. Compresor	124
Figura 105. Multímetro	125
Figura 106. Válvula proporcional.....	125
Figura 107. Alimentadores conectados a la válvula.....	126
Figura 108. Generador de tensión variable.....	127
Figura 109. Láser	128
Figura 110. Esquema del principio de funcionamiento del láser	129
Figura 111. Curva de regresión lineal láser	130
Figura 112. Operaciones de laminación	132
Figura 113. Ciclos de plegado.....	133
Figura 114. Laminador	134
Figura 115. Configuración de la lámina en conformado	134
Figura 116. Esquema de las deformaciones y de las tensiones.....	136
Figura 117. Esquema normal de las tensiones.....	137
Figura 118. Ensayo PbSn60 (50°C) a $P=0,06\text{MPa}$. Pruebas 1 y 2.....	142
Figura 119. Ensayo PbSn60 (50°C) a $P=0,07\text{MPa}$. Pruebas 1 y 2.....	142
Figura 120. Ensayo PbSn60 (50°C) a $P=0,08\text{MPa}$. Pruebas 1 y 2.....	143
Figura 121. Ensayo PbSn60 (50°C) a $P=0,09\text{MPa}$. Pruebas 1 y 2.....	143
Figura 122. Ensayo PbSn60 (50°C) a $P=0,1\text{MPa}$. Pruebas 1 y 2.....	144
Figura 123. Curvas de ajuste resultados experimentales.....	145
Figura 124. Condiciones de contorno	148
Figura 125. Geometría del problema	149
Figura 126. Geometría del problema	150
Figura 127. Fijación de los desplazamientos de los nodos	151



Figura 128. Aplicación de cargas (USER SUB FORCEM)	151
Figura 129. Propiedades del material	152
Figura 130. Material rígido-plástico	152
Figura 131. Subrutina URPFLO	153
Figura 132. Archivo Fortran.....	153
Figura 133. Cuerpos en contacto	154
Figura 134. Cuerpo deformable. Coeficiente de fricción nulo entre cuerpos.....	154
Figura 135. Cuerpo rígido. Coeficiente de fricción nulo entre cuerpos.....	155
Figura 136. Propiedades geométricas. Sólido axialsimétrico	155
Figura 137. Propiedades geométricas. Dilatación constante.....	156
Figura 138. Jobs.....	157
Figura 139. Análisis Mecánico	157
Figura 140. Selección de las condiciones de contorno.....	158
Figura 141. Opciones del análisis mecánico.....	158
Figura 142. Selección variables de salida.....	159
Figura 143. Jobs. Tipo de elemento.....	159
Figura 144. Jobs. Elemento tipo 10	160
Figura 145. Comprobación errores (check)	160
Figura 146. Grabar archivo .dat	161
Figura 147. Archivo .dat	163
Figura 148. Archivo resultados (Post File)	164
Figura. 149. Selección variable a representar: Desplazamiento Eje X.....	165
Figura 150. Desplazamiento Eje X. Incremento 100.....	165
Figura 151. Desplazamiento Eje X. Incremento 200.....	166
Figura 152. Desplazamiento Eje X. Incremento 286. Fin análisis	166
Figura 153. Desplazamiento Eje X. Deformada y original	167
Figura 154. Desplazamiento Eje X. Nodo en estudio	167
Figura 155. Selección variable a representar: Tensión Equivalente de Von Mises.....	168
Figura 156. Tensión Equivalente de Von Mises. Zona más solicitada	168
Figura 157. Selección variable a representar: Deformación plástica equivalente	169
Figura 158. Deformación plástica equivalente. Zona más crítica	169
Figura 159. Diseño gráficas resultados (HISTORY PLOT).....	170
Figura 160. Selección nodo en estudio (SET NODES)	170
Figura 161. Gráficas resultados	171
Figura 162. Simulación Numérica PbSn60 (50°C) a P=0,06MPa.....	172
Figura 163. Simulación Numérica PbSn60 (50°C) a P=0,07MPa.....	172
Figura 164. Simulación Numérica PbSn60 (50°C) a P=0,08MPa.....	173
Figura 165. Simulación Numérica PbSn60 (50°C) a P=0,09MPa.....	173



Figura 166. Simulación Numérica PbSn60 (50°C) a P=0,1MPa.....	174
Figura 167. Curvas resultados simulaciones numéricas	175
Figura 168. Curva Deformación-Tiempo (s).....	176
Figura 169. Curva Velocidad de deformación (s^{-1})-Tiempo (s).....	177
Figura 170. Curva Tensión (MPa)-Tiempo (s)	178
Figura 171. Curva Relación espesor instantáneo-espesor inicial-Tiempo (s)	179
Figura 172. Archivo resultados (Post File) (Molde a P=0.06MPa).....	180
Figura 173. Desplazamiento Eje X. Incremento 250 (Molde a P=0.06MPa)	180
Figura 174. Desplazamiento Eje X. Incremento 420 (Molde a P=0.06MPa)	181
Figura 175. Desplazamiento Eje X. Incremento 683. Fin análisis (Molde a P=0.06MPa)	181
Figura 176. Curva análisis variación del espesor	182
Figura 177. Curva Exp.vs.Curva S.N. P=0,06MPa	184
Figura 178. Curva Exp.vs.Curva S.N. P=0,07MPa	185
Figura 179. Curva Exp.vs.Curva S.N. P=0,08MPa	185
Figura 180. Curva Exp.vs.Curva S.N. P=0,09MPa	186
Figura 181. Curva Exp.vs.Curva S.N. P=0,1MPa	186



ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Algunas características de algunas aleaciones superplásticas de Ti y Al.....	53
Tabla 2. Características de la aleación PbSn60 y del Pb y Sn puros a temperatura ambiente .	54
Tabla 3. Especificaciones técnicas de la válvula MPPE-3-1/8-10-010B	126
Tabla 4. Especificaciones técnicas del variador V 10 NC.....	127
Tabla 5. Especificaciones técnicas del láser.....	128
Tabla 6. Características del laminador M.D.M. LS 120	133
Tabla 7. Resumen resultados Experimentales	145
Tabla 8. Valores de K y m del material PbSn60 a T=50°C	146
Tabla 9. Resumen resultados Simulaciones Numéricas	174
Tabla 10. Tiempos de conformado e incrementos molde.....	183
Tabla 11. Análisis de errores.....	188



1. OBJETIVOS

En este proyecto se efectúa un estudio de una aleación superplástica de Plomo-Estaño PbSn60 (60% de Pb, 40% de Sn).

En primer lugar se efectúan una serie de ensayos experimentales mediante el proceso de Blow Forming para llevar las probetas a rotura y evaluar el desplazamiento sufrido a lo largo del tiempo.

Así mismo, se realizan una serie de simulaciones numéricas en las que se simula este mismo proceso a través de un software de elementos finitos, el Marc Mentat.

Con este estudio, se persigue caracterizar el comportamiento superplástico del material, mediante sus parámetros característicos, la K (constante del material) y la m (índice de sensibilidad a la velocidad de deformación), y mediante una simulación numérica que simule dicho conformado, obtener un modelo fiable que nos permita extraer muchos más parámetros de este mismo proceso.

Mediante estos pasos podremos obtener unas conclusiones que nos permitirán estudiar si es posible la implantación del uso de este tipo de materiales a nivel industrial, y en qué aplicaciones sería posible beneficiarse de sus propiedades.

Por último, se efectuará un análisis adicional de la variación del espesor de la lámina para una configuración de molde típicamente usada en la industria.



2. INTRODUCCIÓN

Con el término superplasticidad se entiende la capacidad de algunos materiales policristalinos de presentar alargamientos muy elevados antes de alcanzar la rotura. El término se relaciona con el comportamiento dúctil a tracción del material; sin embargo, la deformación superplástica tiene la característica de producirse fácilmente sometido el material a bajas presiones, y las características de las deformaciones a compresión también se describen como superplásticas. La ductilidad a tracción de los materiales superplásticos está típicamente en el rango de 200 a 1000% en elongación, pero se han dado casos en que la ductilidad ha excedido del 5000%. Alargamientos de esta magnitud son uno y dos órdenes de magnitud mayores que aquellos observados para los metales y las aleaciones convencionales, y son más característicos de los plásticos que de los metales.

Es importante tener presente que la superplasticidad no se refiere a una clase de materiales, sino que es relativa a las características de deformación de algunos materiales en un campo de temperaturas y de velocidad de deformación restringidos. Muchos de los materiales metálicos requieren procesos de conformado especiales para satisfacer los requisitos microestructurales necesarios para presentar propiedades superplásticas.

Se ha demostrado que el mecanismo de deformación está asociado principalmente al deslizamiento de los bordes de grano cristalino y a los mecanismos de reordenación de los granos. Los requisitos microestructurales y las condiciones de deformación están bien definidos:

*Típicamente, la superplasticidad se da a una temperatura homóloga superior a $0.5 T_m$, donde la T_m es la temperatura de fusión del material.

*La velocidad de deformación es tradicionalmente muy baja, del orden de $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

Se estima que la superplasticidad esté presente en más de 10.000 materiales diferentes y las aplicaciones comerciales están limitadas a las aleaciones de aluminio y titanio principalmente.



El conformado superplástico de materiales se aplica principalmente a láminas de material. Además, las aplicaciones del conformado superplástico están fuertemente concentradas en la industria aeroespacial. En general, el conformado superplástico elimina muchas restricciones de diseño, permitiendo una libertad y facultad creativa en el diseño de componentes y ensamblados.

Como ventajas significativas de los materiales que presentan estas características podemos destacar:

- El proceso se realiza en una única fase; esto conlleva una reducción notable de los costes si se compara con las técnicas de conformado convencional.
- Además, dado que las capacidades y limitaciones de la fabricación de láminas metálicas viene determinada, a menudo, por los límites de la ductilidad a tracción, queda claro que hay potenciales ventajas significativas disponibles a la hora de conformar este tipo de materiales, si las elevadas características de ductilidad observadas a tracción pueden ser usadas en los procesos de conformado.
- Así mismo, el material sujeto al proceso de conformado superplástico responde a la forma del molde de manera bastante exacta.
- Con bajas presiones de conformado se alarga la vida de las máquinas, asegurando repetibilidad geométrica de las formas.
- Las piezas realizadas con el conformado superplástico no tienen un coste elevado para altos volúmenes de producción.

Por otro lado, hay que tener en cuenta una serie de inconvenientes que se dan en este tipo de conformado:

- Los materiales sufren una significativa variación de espesor.
- La materia prima es mucho más costosa que la empleada en otros procesos.

Por lo tanto, es necesario demostrar que los componentes conformados superplásticamente satisfacen los requisitos de diseño evaluando las propiedades mecánicas después del conformado superplástico.



3. SUPERPLASTICIDAD

3.1 REQUERIMIENTOS PARA LA SUPERPLASTICIDAD

Antes de discutir los detalles de los procesos de conformado superplástico, es necesario revisar los aspectos más importantes de los comportamientos de este tipo de materiales, ya que algunos de los específicos parámetros de conformado vienen determinados por este comportamiento.

Hay muchos tipos diferentes de superplasticidad en términos de mecanismos microestructurales y condiciones de deformación incluyendo los siguientes:

- a) Superplasticidad microgranular
- b) Transformaciones superplásticas
- c) Tensión interna superplástica

En este momento, sólo la superplasticidad microgranular es de importancia para la fabricación de piezas, y la discusión será limitada a este tipo. Para la superplasticidad microgranular, las elevadas ductilidades se observan solo bajo ciertas condiciones y los requerimientos básicos para este tipo de superplasticidad son:

- 1) Tamaño muy fino del grano del material (del orden de 10 micras)
- 2) Temperatura relativamente alta (mayor aproximadamente en $\frac{1}{2}$ de la temperatura de fusión)
- 3) Tasa de deformación controlada, normalmente en el rango de 0.0001 a 0.01 por segundo.

Debido a estos requerimientos, solo un número limitado de aleaciones comerciales son superplásticas, y estos materiales son conformados usando métodos y condiciones que son diferentes a aquellos usados para los metales convencionales.

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES SUPERPLÁSTICOS

Para un metal superplástico sometido a tracción bajo ciertas condiciones de temperatura, la ductilidad observada varía sustancialmente dentro de un rango de deformaciones, como se muestra en la **Figura 1** para una aleación eutoectoide de Zn-Al.

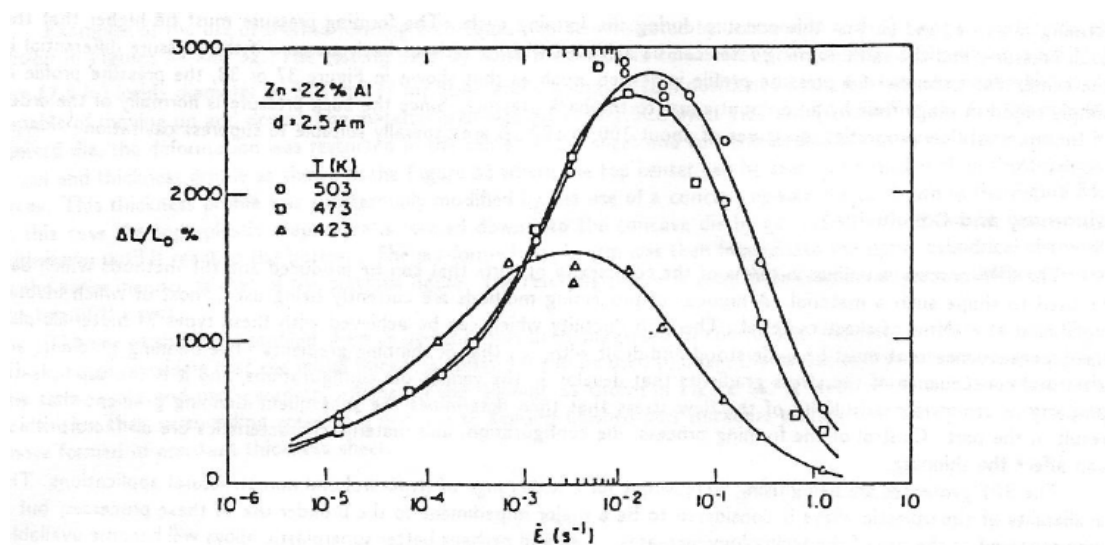


Figura 1. Deformación frente a velocidad de deformación inicial para una aleación de Zn-22Al común con tamaño de grano de 2.5 μm ensayada a temperaturas de entre 423 a 503K

Se observa que hay un máximo de ductilidad para una específica velocidad de deformación, con pérdidas significativas de ductilidad según se incrementa la velocidad de deformación, o decrece en relación a este máximo. Es sabido que el factor primario relacionado con este comportamiento es la velocidad de cambio de la tensión de flujo con la velocidad de deformación, normalmente medida y denominada “m”, el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación donde:

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}}$$

siendo σ la tensión de flujo y $\dot{\epsilon}$ la velocidad de deformación.

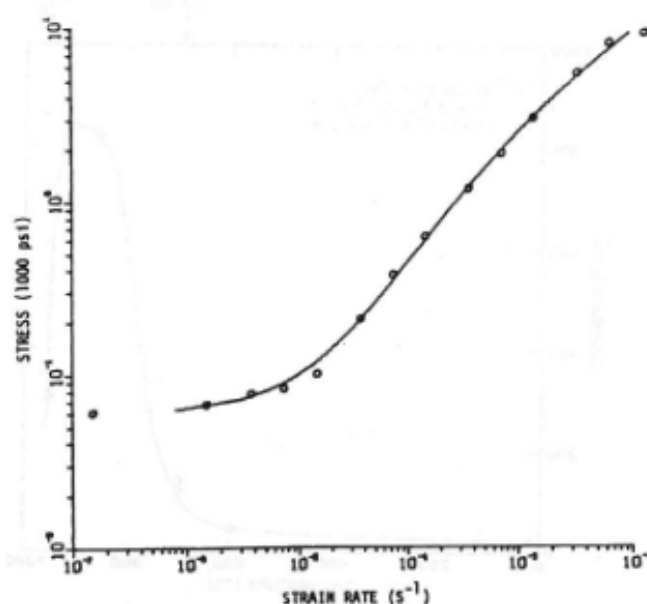


Figura 2. Tensión vs. Velocidad de deformación para Ti-6Al-4V a 927 ° C

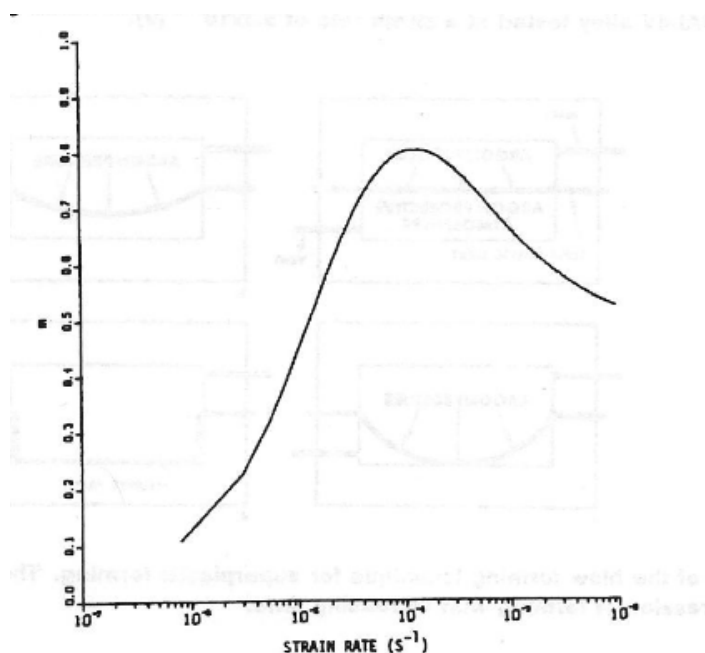


Figura 3. m vs. Velocidad de deformación para el Ti-6Al-4V a 927 °C. Esta curva corresponde a los datos mostrados en la Figura 2

Las propiedades características del flujo para un metal superplástico son ejemplificadas en la **Figura 2** para una aleación de Ti-6Al-4V a 927 °C. La m para estos datos es el diferencial de la curva superior como se indica anteriormente. Un gráfico de m versus la velocidad de deformación se muestra en la **Figura 3**. La alta

sensibilidad de la velocidad de deformación a la tensión de flujo como se indica en las **Figuras 2 y 3** es típica de los metales superplásticos y hay una buena relación entre el valor de m y la ductilidad superplástica, una relación que fue demostrada más claramente por Woodford en un gráfico de datos de un elevado número de aleaciones como se muestra en la **Figura 4** (donde el valor de m es representado como una función de la elongación). Mientras que la elongación total también puede verse afectada por la fractura, la sensibilidad a la velocidad de deformación es un efecto de primer orden. La influencia de la m en la ductilidad se entiende a través de la mecánica de la deformación superplástica, pues es debida al efecto estabilizante de la velocidad de deformación en la tensión de flujo en el difuso proceso de estricción.

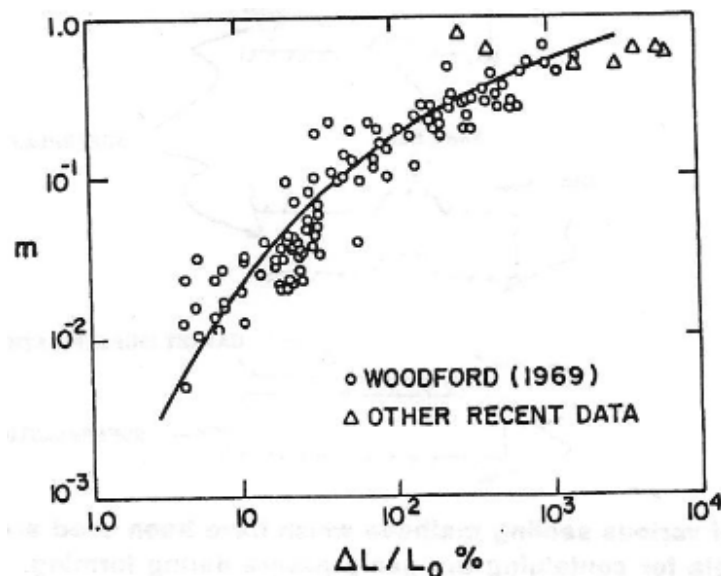


Figura 4. Elongación para una serie de aleaciones

La deformación superplástica se ve también fuertemente afectada por la temperatura, y una ilustración de su comportamiento típico se muestra en la **Figura 5**, donde la ductilidad de una aleación de titanio se grafica como función de la temperatura. Como se puede observar, la elongación aumenta y cae rápidamente superado un rango de temperaturas relativamente corto, y fuera de los límites de esta temperatura el periodo de la ductilidad es bastante modesto, dentro del rango de comportamiento de los materiales convencionales.

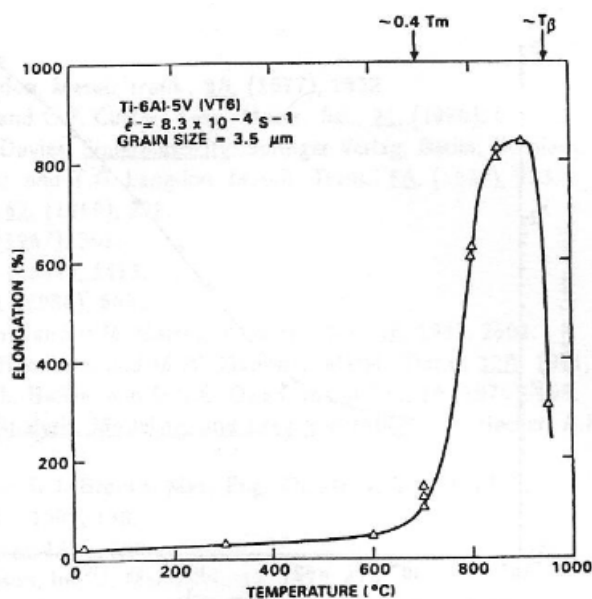


Figura 5. Elongación como función de la temperatura por encima de un rango de temperaturas incluyendo deformaciones superplásticas, para la aleación de Ti-6Al-4V ensayada a una velocidad de deformación de 8.3×10^{-4}

3.2.1 Comportamiento Mecánico: Ecuaciones constitutivas termomecánicas

Las ecuaciones termomecánicas constitutivas de los materiales superplásticos describen las relaciones entre la sollicitación de flujo, la deformación, la velocidad de deformación, la temperatura y otras incógnitas microestructurales, como la dimensión de los granos. Las relaciones matemáticas emplean un cierto número de constantes, como por ejemplo el módulo de Young, el módulo a cortante, la constante universal de los gases, y parámetros asociados al material como la K , m , n , y p . Existen otras variables microscópicas (densidad de las dislocaciones, densidad y orientación de las cavidades) que son difíciles de cuantificar y de utilizar en los cálculos. Si bien son numerosos los materiales (metales, cerámicas, aleaciones, compuestos) que muestran un comportamiento superplástico en un intervalo restringido de temperaturas y de velocidad de deformación, se desea individuar los modelos constitutivos para construir una estructura matemática general para describir su comportamiento mecánico. Esto representa un objetivo muy difícil de conseguir. Para obtener una ecuación constitutiva ideal que pueda describir el comportamiento del material en un amplio rango es necesario recordar que la microestructura influye fuertemente en el comportamiento no elástico, y que ella misma es producto de la composición química inicial y de la historia

de las condiciones de preparación del material a partir de la condición del metal líquido.

En el caso de un material superplástico, se toman en consideración las relaciones que incluyen σ - $\dot{\epsilon}$ - ϵ , teniendo en cuenta la importancia de los efectos de:

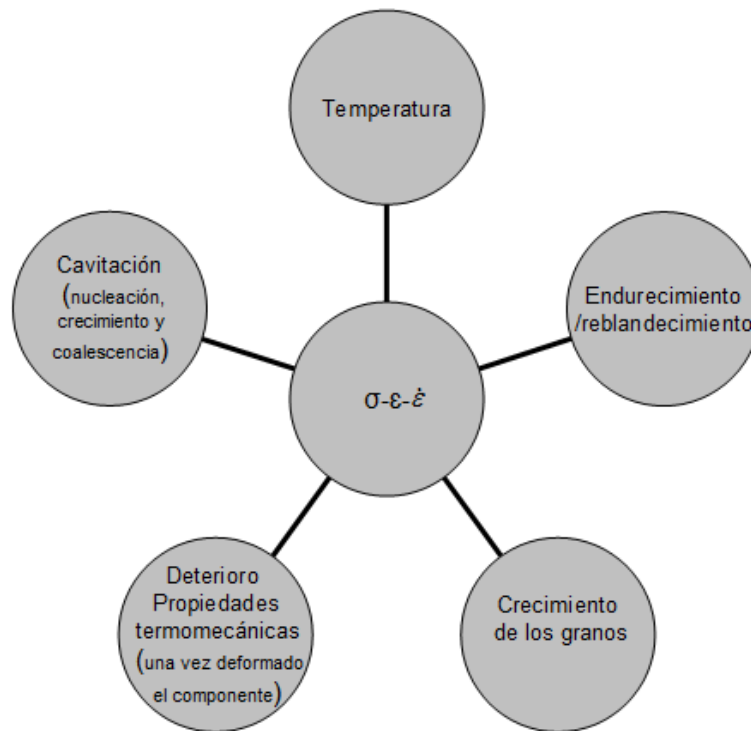


Figura 6. Efectos que influyen en las relaciones σ - $\dot{\epsilon}$ - ϵ

El modelo debe ser suficientemente flexible de tal manera que permita los menos cambios posibles en la composición química del material. Del mismo modo, deben ser pequeños los cambios en los procesos termomecánicos primarios y secundarios de fusión en el interior de la forma del producto y permitir variaciones en la historia de la deformación (variaciones temporales y espaciales de los parámetros de proceso) durante el conformado superplástico. Además, la ecuación constitutiva debería ser lo suficientemente simple para facilitar la evaluación experimental de constantes del material, y parámetros de modelo con un número mínimo de pruebas y con un elevado grado de exactitud y fiabilidad. En definitiva, la ecuación constitutiva debe ser numéricamente simple por estar implementada en un modelo de cálculo. La capacidad de las ecuaciones constitutivas para modelar exactamente las condiciones de

deformación es crítica en la superplasticidad. Por ejemplo, la temperatura influye fuertemente el intervalo de transición del comportamiento plástico al comportamiento superplástico (**Figura 7**)

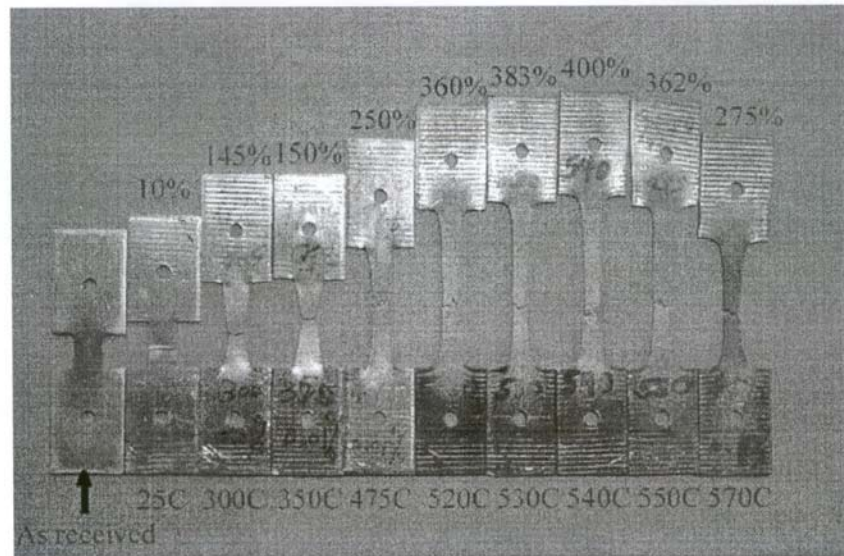


Figura 7. Efecto de la temperatura en el intervalo de transición del comportamiento plástico al comportamiento superplástico

Esta figura muestra el comportamiento de la aleación Al 5083 (Al-4.7% Mg-0.65% Mn) bajo condiciones de carga monoaxial a una velocidad de deformación constante de 10^{-4} s^{-1} . El material muestra un comportamiento superplástico óptimo a 540°C. Se puede ver, además, que las características de deformación cambian significativamente dentro de un campo de $\pm 10^\circ\text{C}$. Además, se puede observar que el material presenta un comportamiento elasto-plástico ya a 200°C. Una ecuación constitutiva formulada de forma apropiada y válida, ayuda a modificar la composición y las condiciones de proceso para inducir la superplasticidad, si no está presente, o bien para obtener las condiciones óptimas.

Existe una necesidad siempre creciente de disminuir la temperatura óptima de superplasticidad, aumentar la velocidad de deformación, extender el intervalo superplástico, y en definitiva, y por último, mejorar las propiedades mecánicas después del conformado, reduciendo la cavitación. Los ingenieros de producción conciben las ecuaciones constitutivas como una representación matemática del material durante todo su proceso de conformado en todos los intervalos de velocidad



de deformación y temperatura, para obtener una forma óptima con el menor deterioro de las propiedades mecánicas después del conformado. Estos ingenieros buscan una forma de ecuación constitutiva simple para la implementación numérica y esperan que dichas ecuaciones (o grupos de ecuaciones) sean válidas para un cierto intervalo de condiciones de proceso durante toda la duración del proceso de conformado. En consecuencia, existe una clara división sobre los requisitos de exactitud y de eficacia de las ecuaciones constitutivas. Inevitablemente, esta división conduce a divergencias en la formulación, la validez y aplicación de las ecuaciones constitutivas. Las ecuaciones fenomenológicas son formuladas basadas en una serie de datos experimentales y en la búsqueda de una función que relacione de la mejor manera posible los datos experimentales con un número específico de coeficientes. Si estas ecuaciones pueden ser consideradas como leyes del material, estas poseen un carácter general con una capacidad productiva fuera del campo de los datos experimentales.

3.2.2 Observaciones microestructurales

Es bien conocido, del estudio de marcas en la superficie y del estudio de las deformaciones, que el mecanismo dominante responsable del alargamiento en la superplasticidad es el deslizamiento de los bordes de grano cristalinos.

Dado que el alargamiento total alcanzado en la superplasticidad es de algunos cientos en porcentaje, el nivel de deslizamiento de los bordes de los granos es significativo. Si bien los detalles geométricos del deslizamiento de los bordes de los granos no son bien conocidos, existe un acuerdo general para asociar las características microestructurales a tal mecanismo.

Durante la deformación, el grano permanece equiaxial o llega a serlo. Puesto que los materiales cristalinos están constituidos por granos contiguos en tres dimensiones, separados solo por los bordes de grano, y dado que se ha observado que los granos se reordenan durante la deformación, deberán ser sometidos a procesos de transformación permitiendo una readaptación geométrica de los granos. Si los bordes de grano llegasen a comportarse como un sistema completamente rígido, se desarrollarían huecos o vacíos en la microestructura. La creación de tales cavidades es una excepción más que una regla, de hecho, la cavitación es la causa principal de



roturas en este tipo de materiales. Muchos materiales superplásticos no tienen cavidad y allí donde están presentes, las cavidades son notables solo después de amplias deformaciones.

Mecanismos de difusión, de dislocaciones y/o la movilidad de bordes de grano pueden actuar como mecanismos de adaptación. La naturaleza exacta de este proceso de adaptación y la velocidad a la cual el proceso tiene lugar han sido sujeto de una intensa investigación durante un largo tiempo y aún no se ha alcanzado un conocimiento completo. En relación a la evolución de la microestructura en los metales que están sujetos a deformación plástica, la orientación de los granos, que inicialmente es casual, rueda entorno a la dirección principal. Aumentando los niveles de deformación plástica, el número de los cristales orientados a lo largo de la dirección principal continua aumentando. Las rotaciones se originan por movimientos de dislocación; de hecho, la densidad de dislocación aumenta con la deformación plástica. El material pasa a ser fuertemente anisótropo, aumentando la propia resistencia a lo largo de la dirección principal de laminación (deformación principal). Los huecos nuclean en las intercaras de los granos y en las intercaras de los bordes de grano, conduciendo velozmente a la inestabilidad del material y a una eventual rotura.

Al contrario, en los materiales superplásticos, la forma y las dimensiones de los granos originarios permanecen esencialmente idénticas para una amplia deformación acumulada. La orientación de los cristales se mantiene con la deformación. La deformación no elástica se produce, principalmente mediante deslizamiento de los bordes de granos readaptados por algunos mecanismos. La actividad de dislocación está limitada al papel de uno de los posibles mecanismos de adaptación; es interesante darse cuenta que no existe un incremento en la densidad de dislocación con la deformación superplástica. Un defecto de readaptación causa huecos o vacíos especialmente sobre las aristas de los bordes de grano, a los puntos triples y en correspondencia de partículas localizadas sobre los bordes de grano. Estas pequeñas cavidades continúan creciendo y en coalescencia, comportando una discontinuidad en el material y una rotura final. Las cavidades que son más redondas se comparan con aquellas asociadas a una deformación elastoplástica. El material no se endurece; la tensión de flujo permanece por tanto prácticamente constante. En pocos materiales el



endurecimiento se debe a un crecimiento de los granos estático (térmico) o dinámico (por deformación).

Las propiedades de los granos después del conformado superplástico muestran un nivel de isotropía relevante que indica que las reorientaciones de los granos son casuales y que no existe alguna dirección principal. Queda claro, de las consideraciones precedentes, que las características microestructurales de superplasticidad son muy diferentes de aquellas de otros procesos no elásticos. Y es también evidente que la superplasticidad no es un comportamiento aislado anómalo, sino que se verifica en una amplia gama de materiales.

Un aspecto característico en los materiales superplásticos es que es posible producir amplios niveles de deformación, siempre que el mecanismo de adaptación sea tal que no cree discontinuidades en el material. Otra característica de la superplasticidad es la capacidad del material de resistir a la estricción. Se sabe que las imperfecciones geométricas del material durante la deformación se alimentan creando un proceso localizado de estricción que lleva a la discontinuidad geométrica y a una eventual rotura. En síntesis, la región con una sección reducida experimenta un nivel de tensión más alto si lo comparamos con el resto de las secciones de la probeta. Esto conduce rápidamente a una situación de inestabilidad llevando a la rotura. La superplasticidad reduce la tendencia a la estricción localizada reduciendo la tensión diferencial, retardando así el proceso de localización. Este efecto está relacionado con los mecanismos de deformación y no con el material específico.

3.3 PROCESOS SPF

Una serie de métodos y técnicas se han enumerado para el conformado de materiales superplásticos, cada uno de los cuales ofrece unas potencialidades únicas y desarrolla un único set de características de conformado. Los siguientes, son métodos de conformado que han sido utilizados con aleaciones superplásticas:

- Blow forming
- Vacuum forming (Vacío)
- Thermo-forming



- Deep Drawing (Embutición profunda)
- SPF/DB

Sólo aquellos procesos relacionados con el conformado de láminas se discuten en este estudio.

❖ **BLOW FORMING Y VACUUM FORMING**

Blow forming y Vacuum forming son básicamente el mismo proceso (algunas veces llamado conformado por estirado) en el que un gas a presión diferencial es impuesto en el diagrama superplástico haciendo que el material se adapte a la configuración del molde. En el Vacuum forming, la presión aplicada se limita a la presión atmosférica (p.ej: 15psi) por lo tanto la velocidad de conformado y las potencialidades son limitadas. Con el Blow Forming, se aplica una presión mediante un compresor, y las únicas limitaciones están por lo tanto relacionadas con la velocidad de presurización del sistema que suministra el gas. Típicamente, una presión máxima de entre 100psi a 500psi se emplea en estos procesos.

El método del Blow Forming se ilustra en la **Figura 8** donde se muestran un corte del molde y un diagrama de conformado. En este proceso normalmente los moldes y las láminas se mantienen a la temperatura de conformado, se impone un gas a presión sobre la lámina causando su conformado en el molde superior, y el gas que se encontraba en esta parte, es simplemente, vertido a la atmósfera. La cámara inferior del molde también puede ser sometida a vacío o a una cierta presión “back pressure”, que puede ser impuesta para suprimir la cavitación, en caso necesario. El concepto de “back pressure” para controlar o prevenir la cavitación se discute en apartados sucesivos de este estudio.

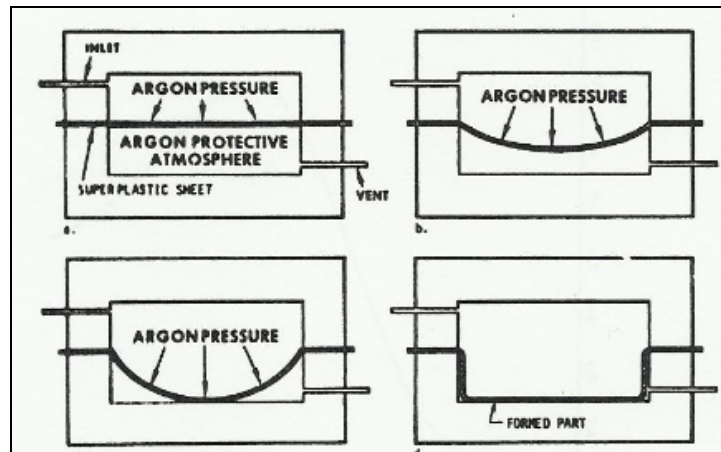


Figura 8. Ilustración de la técnica de Blow Forming para conformado superplástico. La secuencia de a. a la d. indica la progresión del conformado con el tiempo

La periferia de la lámina se mantiene en una posición fija y no desliza hacia el interior, como ocurriría en los típicos procesos de embutición. Es común el uso de herramientas para fijar la lámina en su periferia como se muestra en la **Figura 9**, evitando así que deslice y descienda, formando un sellado para que no se escape el gas y prevenir fugas. La lámina de aleación, por lo tanto, se estira en la cavidad del molde, y todo el material para formar la pieza proviene de la lámina que se coloca en la cavidad del molde. Esto conlleva un considerable adelgazamiento de la lámina para piezas complejas y también puede resultar en gradientes significativos de espesor en la pieza terminada.

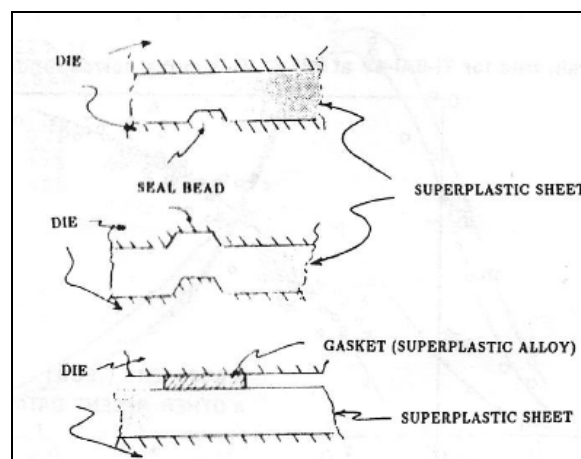


Figura 9. Métodos de sellado con láminas (superplastic sheet), para proporcionar una presión de sellado adecuada para contener el gas en el conformado. Secciones superior e intermedia utilizan zonas de sellado, ya presentes en la herramienta (seal beds), y en la inferior se muestra el uso de un marco superplástico usado como junta blanda (gasket)

Este proceso está siendo usado cada vez más para fabricar piezas estructurales y ornamentales de titanio, aluminio y otros metales. Por ejemplo, el proceso aplicado al conformado del marco de una góndola de un avión se ilustra en la **Figura 10**. En este caso el conformado se lleva a cabo en torno a 1650 F, y el gas inerte (argón) se usa en ambos lados de la lámina de cara a minimizar la oxidación y la subsecuente degradación superficial debido a la reactividad del titanio. El uso de estos gases de protección normalmente no es necesario para aleaciones en aluminio.

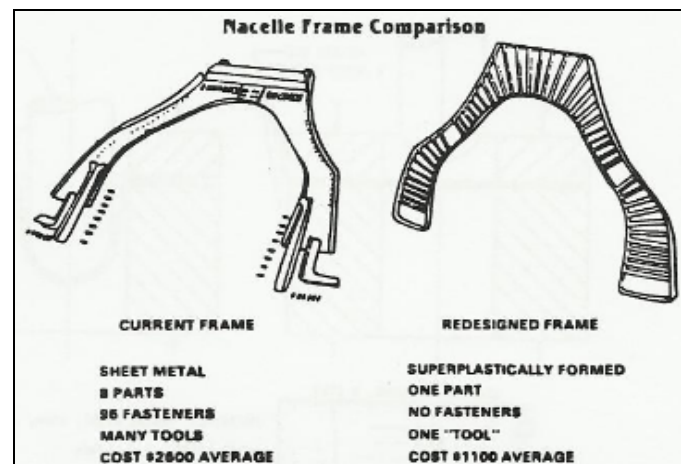


Figura 10. Estructura de un avión que fue rediseñado (redesigned frame) de una configuración tradicional (current frame) a una adecuada para el conformado superplástico y que usara menos piezas y elementos de fijación. La pieza fue fabricada de Ti-6Al-4V

Grandes piezas complejas son conformadas mediante este método, y tiene la ventaja de que no es necesario mover los componentes del molde. Múltiples piezas pueden ser formadas mediante un solo ciclo de proceso y este hecho permite incrementar la velocidad de producción para algunas piezas.

❖ **THERMO-FORMING**

Los métodos de termo conformado han sido adoptados desde las tecnologías de plásticos para el conformado de metales superplásticos, y pueden llegar a emplear miembros móviles o ajustables en los moldes, en conjunción con gas a presión o vacío. Una ilustración de las técnicas que se emplean en estos procesos se muestra en la **Figura 11**. En el primer caso, un punzón macho se emplea para inicialmente conformar por estirado la lámina superplástica, seguida de la aplicación de gas

presurizado para forzar el conformado de la lámina contra la configuración del molde, terminando así el proceso.

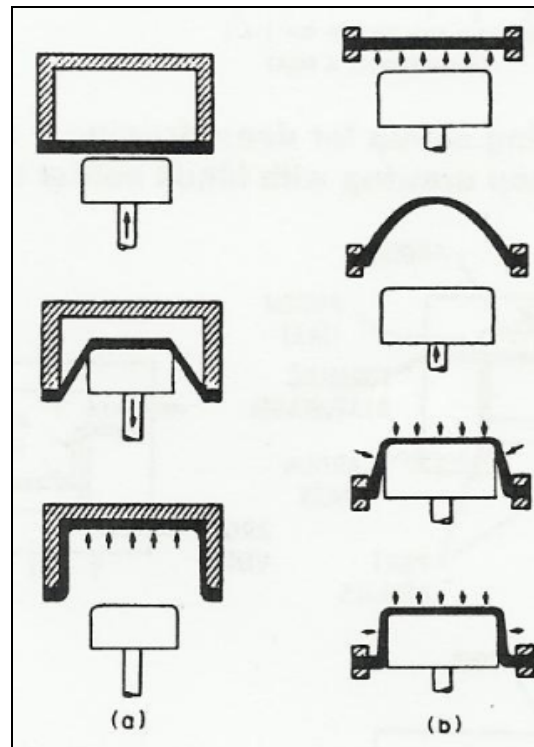


Figura 11 Ejemplos de termo conformado usados en el conformado superplástico implicando: a. Conformado asistido por corriente en una cavidad de un molde hembra y b. Conformado “snap back” sobre un molde macho que es movido hacia la lámina

Otro método también ilustrado en la **Figura 12** emplea un miembro móvil del molde, el cual ayuda en el pre-estirado del material de la lámina antes de aplicar el gas a presión. En este caso, el gas a presión se aplica desde el mismo lado de la lámina que la parte móvil del molde. Estas dos técnicas proporcionan maneras de producir diferentes formas de piezas, y pueden ser usadas de manera efectiva para controlar las características de adelgazamiento de la pieza terminada.

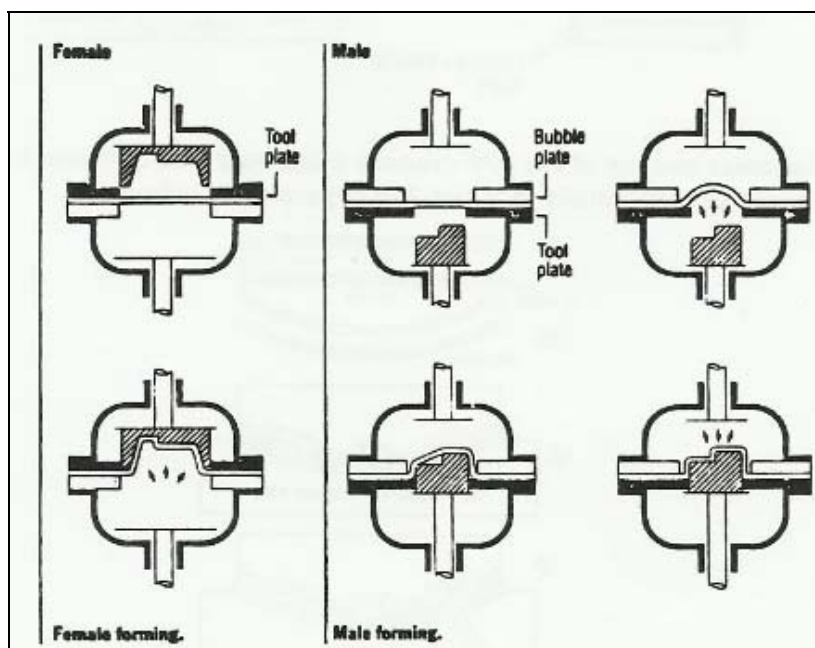


Figura 12 Métodos de termo conformado que emplean gas a presión y herramientas móviles para producir piezas a partir de aleaciones superplásticas. Tanto los moldes móviles macho como hembra han sido empleados de la manera mostrada en la imagen

❖ DEEP DRAWING

Habiéndose desarrollado los estudios de deep drawing (embutición profunda) con metales superplásticos, se ha visto que este proceso no parece ofrecer muchas ventajas significativas en el conformado de materiales superplásticos. El deep drawing depende del endurecimiento por deformación para alcanzar el conformado requerido y prevenir el adelgazamiento y la ruptura durante el conformado. Los materiales superplásticos no se endurecen con la deformación demasiado, pero dependen del endurecimiento con la velocidad de deformación para sus características de conformado, y esta propiedad parece ofrecer poca ayuda a la embutición profunda.

La dificultad es que, con el objetivo de embutir en el reborde, el material en contacto con el punzón, así como el del lateral, deben endurecerse para soportar las crecientes tensiones requeridas (y a temperaturas superplásticas no se da un significativo endurecimiento). Una técnica que tiende a mejorar la embutibilidad de las aleaciones superplásticas es la de Hawkins y Belk. Este método, ilustrado en la **Figura 13**, utiliza un punzón refrigerado a una temperatura por debajo de la temperatura de conformado, mientras que la herramienta que sujeta fija la lámina se mantiene a la temperatura de

conformado. En sus estudios, demostraron que esta técnica con diferencial de temperatura permitía un incremento del ratio límite de embutido (LDR) desde 2,4:1 para condiciones isotermas a más de 3,75:1 para el método de temperaturas diferenciales. Las características de adelgazamiento para este proceso se muestran en la **Figura 13**. Un ligero adelgazamiento puede verse por encima del (frío) punzón, y un adelgazamiento sustancial se ve en el material adyacente al punzón, cuya extensión depende de la carga de fijación (hold-down-load), pero incrementa con diámetros mayores de la lámina (ratio) y velocidades decrecientes del punzón. Se observa que a distancias grandes del centro del punzón, donde ha ocurrido un embutido sustancial del material, existe un aumento del espesor.

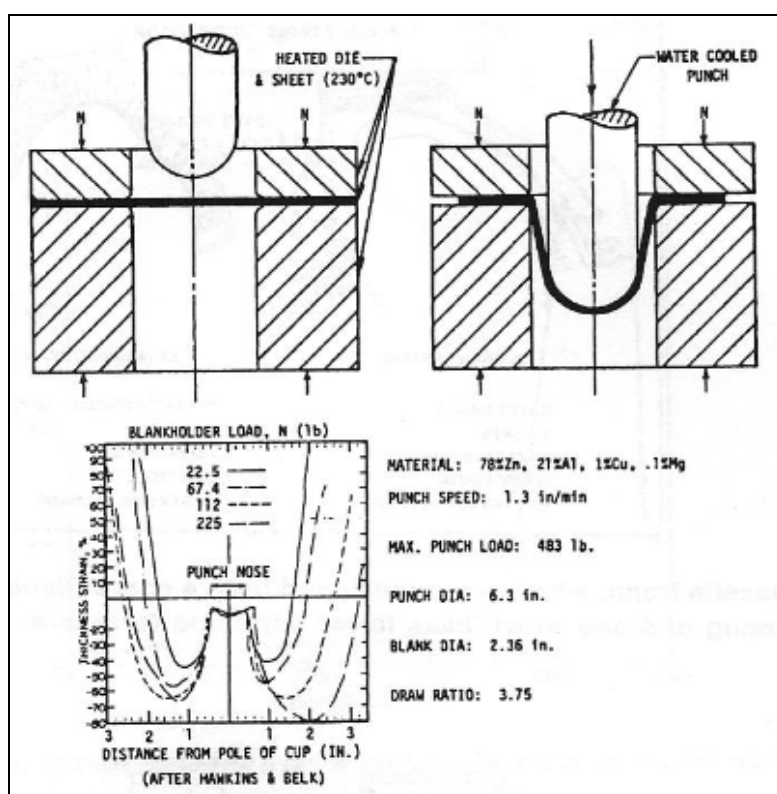


Figura 13. Esquema de la preparación del punzón para un proceso de embutición de una lámina superplástica. Así mismo, se muestran los perfiles de disminución del espesor resultantes de una embutición con un contramolde de sujeción de la lámina

Otro concepto evaluado para explorar la capacidad de embutición fue el comentado por Al-Naib y Duncan. Este método utilizaba aceite a elevadas presiones alrededor de la periferia de la lámina para ayudar en la embutición, de hecho, es un proceso combinado de extrusión y embutición. En este estudio se usó la aleación de PbSn

eutéctica, la cual permitía su procesamiento a temperatura ambiente. Se consiguió un buen control del espesor de la pared, pero la aplicabilidad del proceso a aleaciones que requieren altas temperaturas todavía está pendiente de demostración.

❖ **SPF/DB (SUPER PLASTIC FORMING/DIFFUSION BONDING)**

Desarrollos recientes han demostrado que una serie de procesos únicos están disponibles si métodos de unión tales como el Diffusion Bonding o Difusión de uniones (DB), pueden ser combinados con Super Plastic Forming o Conformado superplástico (SPF). A dichos procesos generalmente se hace referencia como procesos SPF/DB (ver **Figura 14**). Mientras que el DB no es un proceso para conformado de láminas, cuando se combina con SPF resulta una considerable extensión del SPF, tal que la discusión de SPF está incompleta sin estos resultados.

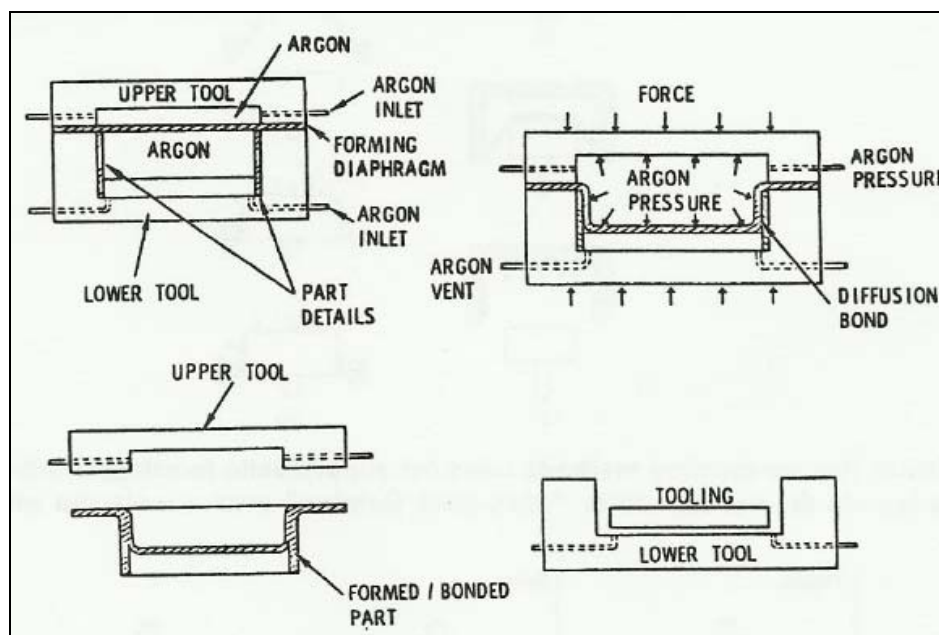


Figura 14. Representación de la sección transversal de un proceso combinado de SPF con difusión de uniones SPF/DB. El proceso mostrado utiliza detalles pre colocados a los que el material superplástico se une

Los procesos SPF/DB han evolucionado como combinaciones naturales de los procesos SPF y DB, ya que los requerimientos de temperaturas para ambos son similares. Las bajas propiedades de fluencia características de las aleaciones superplásticas ayudan a los requerimientos de presión del DB, y se ha visto que a

muchas aleaciones superplásticas se puede aplicar DB en bajos rangos de presiones, iguales que los usados para el procesado SPF. El método SPF usado con SPF/DB hasta la fecha es el Blow Forming.

El proceso resultante, SPF/DB, consta de las siguientes variaciones:

- 1) Conformado de una sola lámina, con detalles preestablecidos, seguida de difusión de uniones (difusión bonding) como se muestra en la **Figura 14**.
- 2) Diffusion bonding de dos láminas en localizaciones seleccionadas seguida de conformado de una o ambas en un molde, como se muestra en la **Figura 15** (también puede ser usada la secuencia inversa).
- 3) Diffusion bonding de 3 o más láminas en localizaciones seleccionadas bajo gas a presión, seguido de expansión debido a la presión del gas interno que conformará las dos láminas exteriores en un molde y, en el proceso, la lámina central es estirada configurando el núcleo, como se muestra en la **Figura 16**.

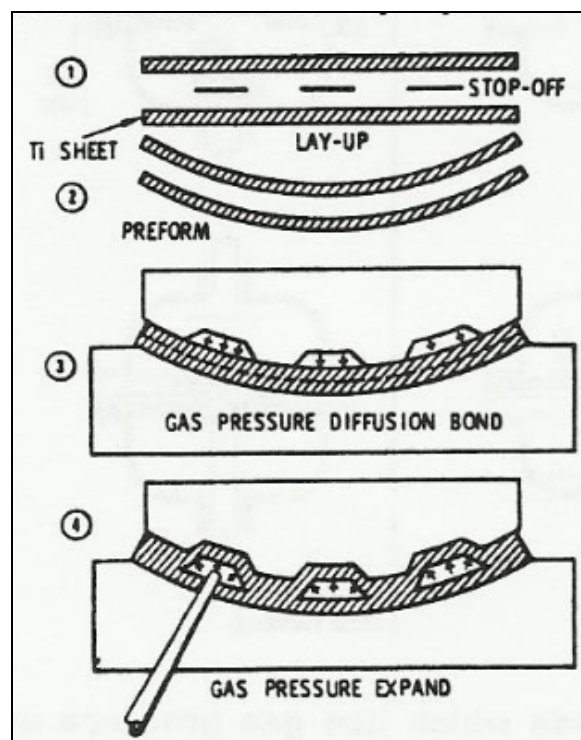


Figura 15. Ilustración del proceso SPF/DB para piezas de dos láminas

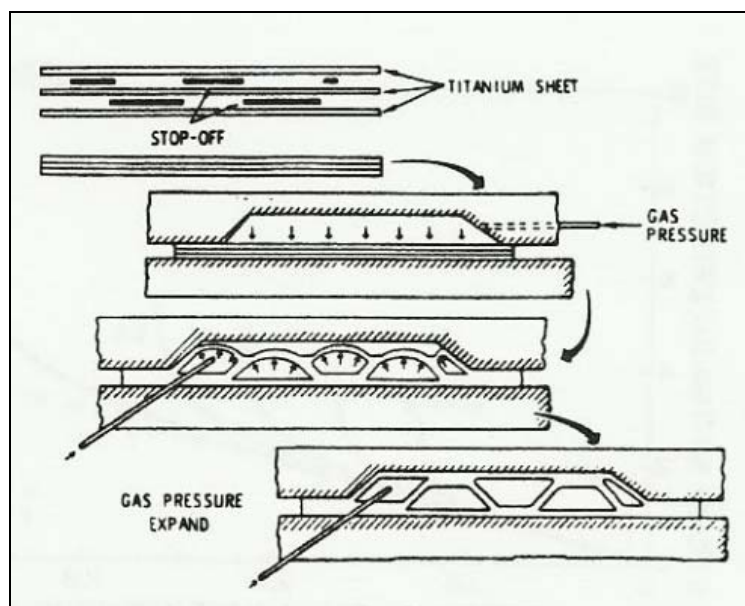


Figura 16. Ilustración del proceso de SPF/DB para piezas con 3 láminas

Con el objetivo de desarrollar la difusión de uniones en áreas locales predeterminadas, han sido usadas un par de técnicas diferentes:

Una de ellas es usar un agente de separación o “stop-off” entre las láminas en las áreas locales donde no se desea que ocurra el DB. Los materiales de stop-off adecuados variarán según la aleación que se esté usando y las temperaturas. Por ejemplo, Itria o nitruro de boro han sido usados con éxito como materiales de stop-off para aleaciones de titanio procesadas a temperaturas de, al menos, 930 °C. Dichos materiales de stop-off pueden ser suspendidos en un aglutinante, como por ejemplo un acrílico. Después de la operación de DB, el área donde hemos puesto el material de stop-off no ha sufrido la difusión de uniones, y el gas puede ser aplicado internamente a través de ese patrón, causando así que las láminas externas se separen conformando un molde.

Una modificación del método anterior es usar un mínimo de 4 láminas para hacer un panel tipo sándwich, expandiendo las láminas externas primero (la piel), y después mediante difusión de uniones (o soldadura) las láminas interiores para definir la estructura del núcleo. Finalmente, expandiendo el núcleo para que se una mediante difusión con las láminas externas, se completa así el conformado de la estructura tipo sándwich. Esta secuencia se muestra en la **Figura 17**.

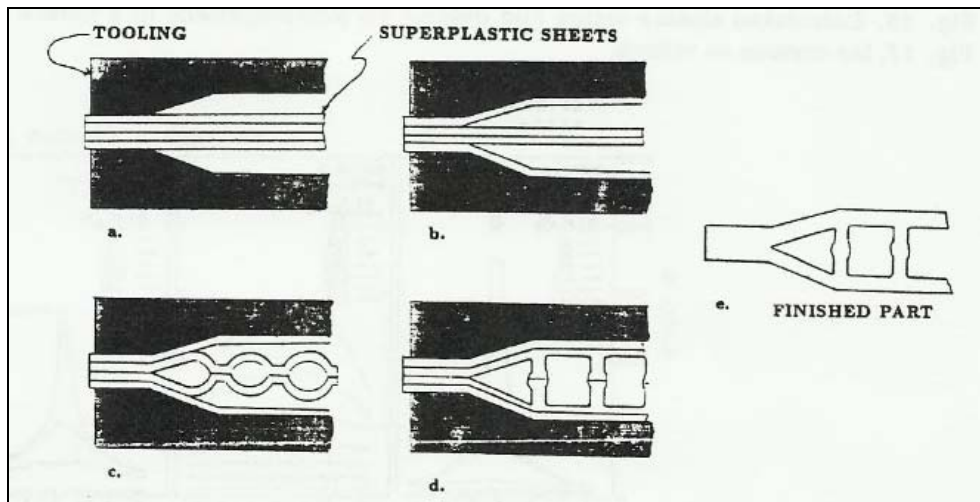


Figura 17. Ejemplo de un proceso de SPF/DB para una pieza de 4 láminas en el cual las láminas externas son conformadas primero, después se conforman las láminas centrales y finalmente se unen por difusión de uniones a las otras dos láminas externas

3.3.1 Procesos de conformado. Herramientas

El conformado de láminas superplásticas implica métodos que en general son diferentes de aquellos usados en otros procesos de conformado de láminas más convencionales, y las condiciones de conformado y el entorno son diferentes. Por este motivo, las herramientas y los equipos que se usan, en general, son diferentes.

3.3.2 Equipos de conformado

Para el Blow Forming y el Vacuum Forming, hay que proporcionar restricciones a las herramientas de conformado para contrarrestar las presiones del gas de conformado. Así mismo, necesariamente se requiere un sellado en la interfaz entre la lámina y la herramienta alrededor de la periferia, para prevenir pérdidas del gas a presión. Normalmente se utilizan prensas para lograr este objetivo. Prensas hidráulicas y sistemas de anclaje mecánico son usados, teniendo cada uno sus ventajas y sus desventajas. Las prensas hidráulicas pueden ser cargadas y descargadas fácilmente, pero requieren un capital de inversión significativo. Los sistemas de anclaje mecánico son mucho más baratos, pero son más incómodos de cargar y descargar. Recientemente, sistemas robóticos han sido combinados con una prensa hidráulica para ayudar a su carga y descarga. Este tipo de sistemas es especialmente



beneficioso para operaciones de conformado a elevadas temperaturas, tales como el procesado SPF de aleaciones de Ti.

Las prensas hidráulicas usadas son tanto de simple efecto como de doble efecto. En las de simple efecto, la prensa actúa aplicando la presión únicamente. En las prensas de doble efecto, la prensa puede también mover moldes hacia la lámina a conformar, y ayudar de manera efectiva en el control de los gradientes de la reducción de espesor (como se muestra en las **Figuras 11 y 12**)

El sistema de calentamiento usado debe estar hecho a medida, según la temperatura requerida y los gradientes de temperatura permitidos. La fuente de temperatura más común es el calentamiento eléctrico, en el cual, elementos calentadores (resistencias) están incrustados en “platos de presión” metálicos o cerámicos. Están colocados entre la herramienta y los platos de la prensa. Esto facilita un buen control de la temperatura y una fuente de energía limpia. Los platos calentadores pueden disponerse en secciones de elementos calefactores, y cada sección puede ser controlada por sensores de temperatura independientes (para minimizar los gradientes de temperatura en el molde de conformado. Gradientes de temperatura significativos podrían llevar a una reducción excesiva del espesor, o a la rotura de la lámina durante el conformado.

3.3.3 Materiales de los útiles de conformado

Los útiles empleados en los procesos SPF son generalmente calentados hasta la temperatura de conformado, y están sujetos a la presión interna del gas y las cargas de sujeción. La presión interna del gas se encuentra generalmente, en torno a 500 psi, y este no suele ser normalmente parámetro crítico de diseño en los útiles de SPF. Más importantes son las cargas de anclaje y las tensiones térmicas que se dan durante el calentamiento y enfriamiento, y las condiciones del ambiente. Las tensiones térmicas pueden causar distorsiones permanentes en el molde. Esto se controla seleccionando un material que tenga buena resistencia a los esfuerzos y al creep, a la temperatura de conformado. Un calentamiento y un enfriamiento lentos de las herramientas, pueden reducir las tensiones térmicas que se forman. Los materiales con un coeficiente pequeño de expansión térmica, y aquellos que no sufren transformación durante el



calentamiento y el enfriamiento son los preferidos para los procesos SPF a alta temperatura.

El efecto del entorno puede ser severo para el conformado de materiales a altas temperaturas, como el caso de las aleaciones de Ti, Fe, Ni, y otros metales de altas temperaturas. La oxidación puede alterar las condiciones superficiales de los útiles, y por lo tanto afectar a las cualidades superficiales de la pieza producida por SPF (eventualmente afectando a características dimensionales).

Otro factor ambiental importante es la compatibilidad entre la lámina superplástica y el utillaje, y a su vez, la compatibilidad de estos con los materiales de stop-off que podrían ser usados. La interdifusión en esta interfaz entre los útiles y la lámina puede resultar en la degradación de ambos materiales. Metales reactivos, como las aleaciones de Ti, son especialmente propensos a este problema. Los materiales del utillaje que se ha visto que funcionan bien con aleaciones de Ti son aleaciones Fe-22Cr-4Ni-9Mn y materiales similares. Los agentes para “separado”, o “stop-off”, también son útiles para minimizar la interacción. Del mismo modo, materiales tales como el nitruro de boro y el óxido de itrio han sido usados con éxito. Generalmente, los materiales con una baja solubilidad sólida en lámina, son buenos candidatos para la compatibilidad.

Una variedad de materiales han sido usados para los útiles de los SPF, incluyendo metales y aleaciones, cerámicos y grafito. Las herramientas metálicas son preferidas para grandes producciones, de 100 piezas o más. Las herramientas de grafito son adecuadas para una producción de en torno a 100 piezas, y son fácilmente trabajadas a mano (aunque existe un problema con la limpieza del entorno de trabajo cuando se usa este material). Los cerámicos pueden ser fundidos para que formen la geometría deseada, y por lo tanto son muy baratos para piezas de gran tamaño. Los cerámicos están sujetos a agrietamientos y degradación rápida, y por lo tanto requieren reparaciones frecuentes. Por este motivo, las herramientas de conformado de cerámicas se consideran para pequeñas cantidades de producción, normalmente menos de 10 piezas.

3.3.4 Características de reducción del espesor

Para poder sacar partido de las elevadas elongaciones posibles con los materiales superplásticos, es necesario aceptar la correspondiente reducción del espesor en la lámina del material, como consecuencia natural de las condiciones de deformación. Para deformaciones superplásticas, las deformaciones elásticas son despreciables, y por lo tanto, se puede asumir **volumen constante**. De esta consideración se concluye que la suma de las deformaciones plásticas es cero, y el esfuerzo de tracción en una dirección debe ser equilibrado por esfuerzos de compresión (negativos) en otra. Las deformaciones son:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$$

Donde ε es la deformación, y los subíndices indican las direcciones principales. Por ejemplo, en una operación de conformado de una lámina bajo condiciones de tensión plana, $\varepsilon_2=0$ y $\varepsilon_3=-\varepsilon_1$. En este caso la deformación que disminuye el espesor (ε_3) es igual y opuesta al esfuerzo de tracción longitudinal, y la reducción del espesor, por lo tanto, coincide con la deformación a tracción. Para grandes deformaciones, la reducción del espesor será igualmente grande. En concordancia, según crece la reducción del espesor, la tendencia a desarrollar gradientes de reducción de espesor, también aumenta.

Mientras que los materiales superplásticos resisten de manera efectiva el proceso de estricción, algún cuello de estricción si que se forma (en relación con el valor de m), y se desarrollan gradientes de reducción del espesor. Por lo tanto en el diseño y el procesamiento de piezas conformadas superplásticamente, es importante considerar y entender la reducción del espesor.

3.3.4.1 Control de la reducción de espesores

Dado que las piezas creadas mediante conformado superplástico típicamente son estiradas hasta muy grandes elongaciones, las variaciones de espesor son potencialmente grandes para una pieza. Por lo tanto, es a menudo importante controlar las variaciones de espesor para cumplir las *tolerancias* requeridas según la pieza. Aunque rara vez es posible prevenir las variaciones de espesor, hay técnicas



que se pueden utilizar para controlar este problema. Además del empleo de dichos métodos, el diseñador puede a menudo acomodar variaciones en el espesor si sabe de antemano cuales serán dichas variaciones. Éste último tipo de aproximación es una muy importante y viable, pero no se describirá aquí puesto que está más allá del objeto de este estudio.

Los métodos para controlar la variación de espesor son:

- 1) Procesado del material superplástico para alcanzar un elevado valor de " m ".
- 2) Uso de lubricación en la superficie.
- 3) Uso de métodos de termo conformado para controlar la deformación localizada.
- 4) Modificación del molde o diseño de la pieza para minimizar las concentraciones locales de tensión.
- 5) Conformado de una lámina espesa.
- 6) Aplicación de presión de manera controlada y con un perfil para controlar la velocidad de deformación hasta un valor correspondiente a un valor elevado de " m ".

Como la lámina inicial normalmente ha sido obtenida de un proveedor comercial, las propiedades superplásticas del material son controladas en fábrica. Sin embargo, sería prudente para la planta de conformado obtener material bajo un control y unas especificaciones apropiadas.

El método de termo conformado ha demostrado ofrecer técnicas efectivas que pueden controlar los gradientes de reducción de espesores en piezas en embutición, con un solo hueco. En estos métodos, una herramienta móvil, normalmente usada para preconformar la lámina antes que se produzca la forma terminada, causando que la fricción local minimice la deformación en ciertas localizaciones, mientras que la secciones en conformado libre continúan deformándose.

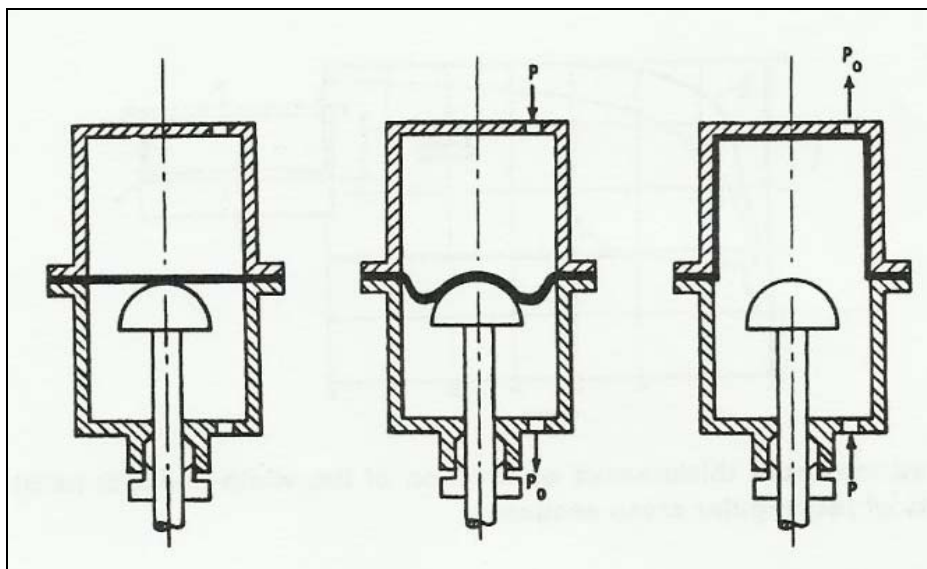


Figura 18. Aparatos para termo conformado de láminas de materiales superplásticos usando un molde convexo para controlar el adelgazamiento, en forma de “sombrero”

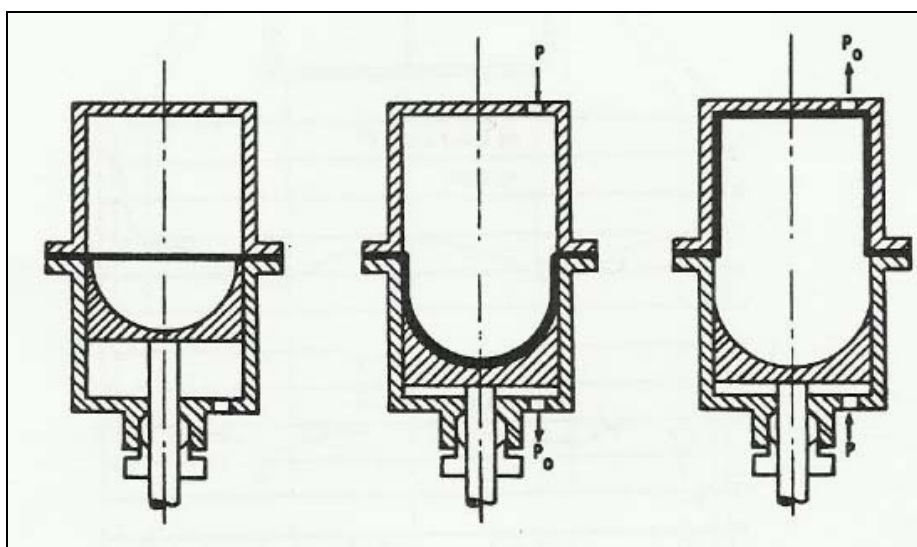


Figura 19. Aparatos para termo conformado de láminas de materiales superplásticos usando un molde cóncavo para controlar el adelgazamiento, en forma de “sombrero”

Ejemplos del uso de técnicas de termo conformado fueron demostrados por Johnson y otros investigadores, usando los aparatos mostrados en las **Figuras 18 y 19**. El instrumento usado por esos investigadores en el ensayo consistía en dos cámaras cilíndricas, cada una con 190 mm de diámetro y 178 mm de diámetro interior, y un pistón hidráulico posicionado en el fondo de la cámara, que podía moverse hacia arriba y hacia abajo. El material usado fue una lámina de Zn-22Al-1.5Cu de 1.22mm de grosor. Para la parte convexa del molde superior, la deformación estaba restringida

en el centro de la lámina y concentrada en el área externa, resultando en una deformación (a) y perfil de espesores (b), como se muestra en la **Figura 20**.

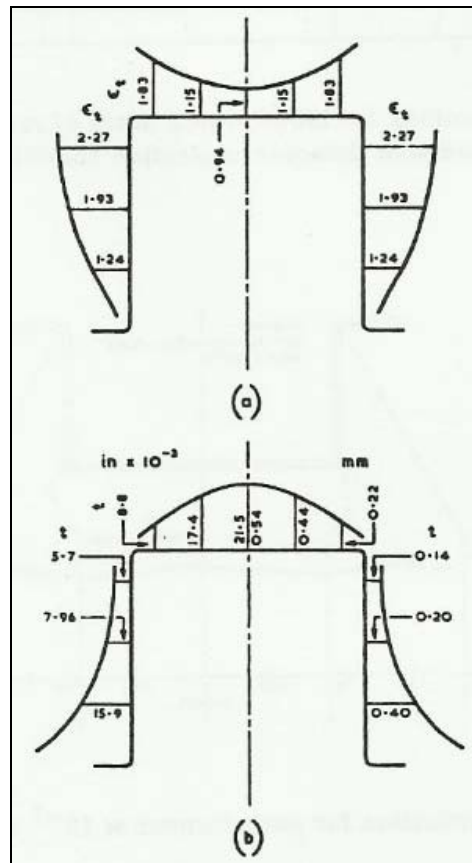


Figura 20. Deformaciones (a) y perfil de espesores (b) para una configuración de “sombrero” con un molde convexo como el de la Figura 18

En ella, la parte superior central se ve que es más espesa que las áreas adyacentes. Este perfil de espesores fue sustancialmente modificado mediante el uso de un molde superior cóncavo, como se muestra en la **Figura 21**.

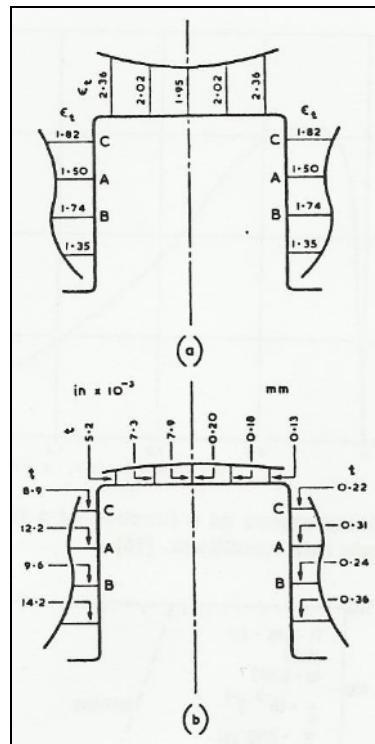


Figura 21 Deformaciones (a) y perfil de espesores (b) para una configuración de “sombrero” con un molde cóncavo como el de la Figura 19

En este caso, la lámina superplástica fue conformada en el molde cóncavo mediante gas a presión, y el molde fue ligeramente retirado hasta alcanzar el fondo. La lámina pre-deformada se conformó, a continuación, en la parte cilíndrica superior de la cámara de la misma manera que en la figura previa. El perfil resultante es considerablemente más uniforme a través de la parte superior de la pieza.

Se ha sugerido el uso de láminas con perfiles de espesores iniciales para controlar la variación del espesor en la parte final. El concepto considera que las variaciones iniciales de espesor pueden ser usadas para compensar las subsecuentes variaciones resultantes del estado de tensión y de los efectos de la geometría de la pieza en la reducción de espesor, como se muestra en la **Figura 22**. Si las áreas que reducirán su espesor excesivamente son más gruesas que las áreas circundantes, es posible desarrollar perfiles de espesor en las piezas terminadas que son más uniformes que aquellos formados a partir de láminas de espesor constante.

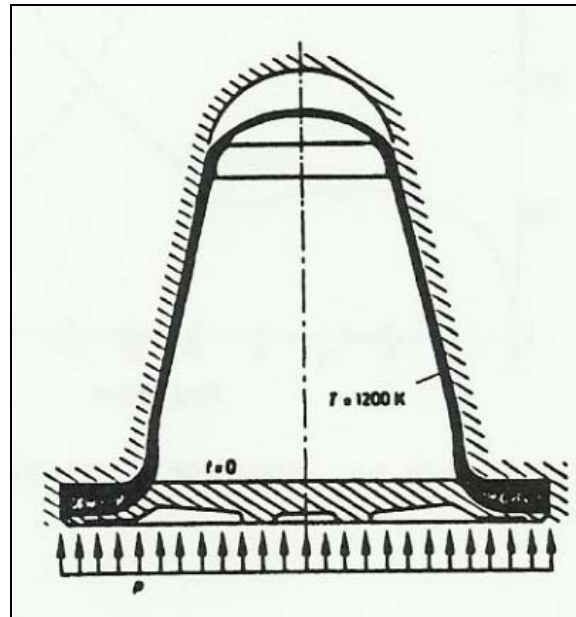


Figura 22. Boceto del concepto de conformado de una lámina de un material que ya posee un perfil de espesores antes del conformado

3.3.5 Perfil de presiones

Llegados a este punto, es bien sabido que el valor de m para las aleaciones superplásticas variará con la velocidad de deformación, y a menudo variará también con la deformación. La velocidad de deformación impuesta durante el proceso de conformado determinará por lo tanto el valor de m , y si la velocidad de deformación varía durante el proceso de conformado, el correspondiente valor de m y la uniformidad en la reducción de espesor relacionada variará también.

3.3.6 Cavitación y control de la cavitación

La mayoría de las aleaciones superplásticas tienden a formas huecos, o cavidades, en localizaciones intergranulares durante la deformación superplástica. A este proceso se le llama “cavitación”. La cavitación puede dar lugar a la degradación de la resistencia y otras propiedades de diseño, y se enfrenta de una de estas dos maneras:

- 1) Estableciendo propiedades de diseño reducidas
- 2) Utilizando una técnica de “back-pressure” para controlar la cavitación.

La cavitación convencional como función de la deformación, se muestra en la **Figura 23** para una aleación de aluminio. Se puede observar que la cantidad absoluta de cavitación en términos de fracción de volumen, no es grande, pero depende de la deformación impuesta. El uso del concepto de “*back pressure*” impone una presión hidrostática en la lámina, durante el conformado. Si esta presión es del orden de la tensión de fluencia, la cavitación se puede reducir, o suprimir completamente. Un ejemplo del efecto del “*back pressure*” en la tasa de desarrollo de la cavitación, se muestra en la **Figura 24**.

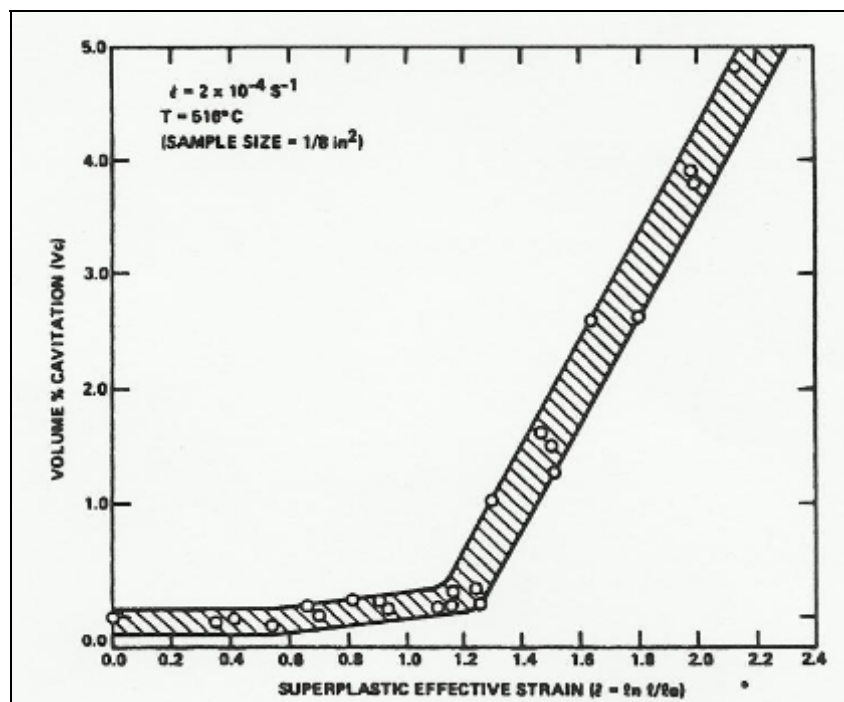


Figura 23. Desarrollo de la cavitación con deformación por tracción uniaxial en una aleación de Al 7475 deformada a 516°C bajo una velocidad de deformación constante de $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

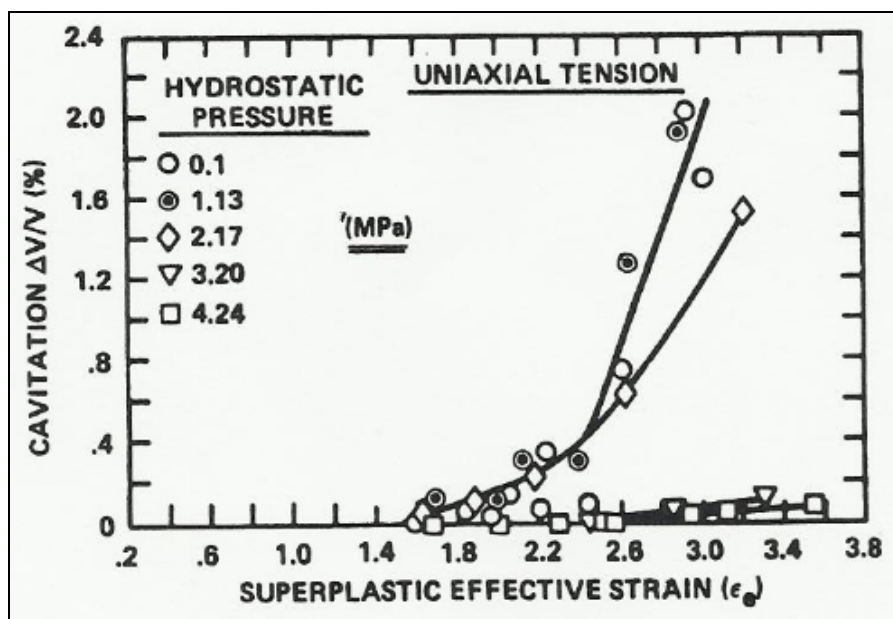


Figura 24. Efecto de la presión hidrostática en la eliminación de la cavitación en la aleación superplástica de Al7475, deformada a 516 °C

En la práctica el “back pressure” se consigue imponiendo una presión en la parte de atrás de la lámina (“back side”), que se oponga a la presión de conformado, y sostener esta presión a lo largo del ciclo de procesado. La presión de conformado debe ser mayor que la presión trasera, y las mismas tasas de conformado pueden ser alcanzadas con/sin presión posterior (“back pressure”) si el diferencial de presión es el mismo.

3.3.7 Resumen y conclusiones

El proceso de SPF es único en términos de complejidad de las piezas que con él se pueden producir, y los métodos que pueden ser usados para dar forma a dicho material. Un cierto número de métodos de procesado están siendo usados hoy en día, la mayoría de los cuales implican estirado significativo del material. La elevada ductilidad que puede ser alcanzada con este tipo de materiales tiene una consecuencia que se debe entender, y con la que se debe tratar, los gradientes de reducción del espesor. Éstos, son una consecuencia natural de los gradientes de tensión que se desarrollan en las diversas configuraciones de molde. Así, es la propiedad superplástica de sensibilidad a la velocidad de deformación de la tensión de flujo la que determina el correspondiente gradiente de reducción del espesor que

sufrirá la pieza. El control del proceso de conformado, de la configuración del molde, y características del material son todos factores que pueden afectar a la reducción del espesor.

Los procesos de SPF cada vez se usan más, para un amplio rango de aplicaciones estructurales y no estructurales. La disponibilidad de las aleaciones superplásticas es considerado un impedimento de primer orden para que se extienda el uso de estos procesos, pero sería de esperar que a medida que el uso de la tecnología aumente, más y quizá mejores aleaciones superplásticas estén disponibles.

3.4 APLICACIONES

El conformado superplástico comercial incluye preferencialmente aleaciones de aluminio, níquel, zinc y titanio para la producción de componentes en las industrias automotriz, aeroespacial, médica, etc. Varias aleaciones ligeras de gran importancia industrial y comercial exhiben superplasticidad, como la aleación de titanio Ti6Al4V, la aleación de aluminio 5083 y la aleación de magnesio AZ31. De hecho, para estas y muchas otras aleaciones ligeras, el conformado mediante cualquier otra técnica sería poco práctico, debido a su limitada conformabilidad en otras condiciones. En la **Figura 25** se muestran algunas piezas fabricadas por este método.



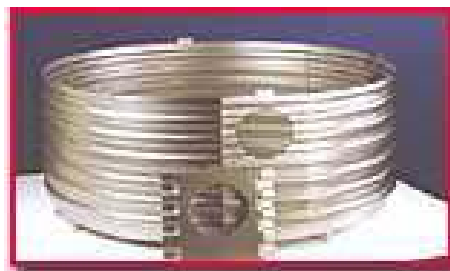
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 25. Elementos fabricados mediante conformado superplástico: a) carrocería en aluminio, b) cubierta de sensor, c) cubierta central del cono, d) escudo térmico cruzado

Las propiedades termomecánicas de los materiales obtenidos con esta tecnología, hacen que su aplicación industrial sea insustituible para la obtención de piezas de formas complicadas que requieran altas exigencias en el conformado o en el servicio, como las partes estructurales de aviones supersónicos. Actualmente, esta propiedad está presente en cerámicos con tamaño de grano $<1\ \mu\text{m}$, y ha situado el estudio de cerámicos superplásticos como un campo de investigación de gran interés. En estos últimos años se han encontrado deformaciones de hasta un 1040% en un policristal de circonio tetragonal estabilizado con Itria (YTZP).

3.4.1 Utilización industrial de los materiales superplásticos

El fenómeno superplástico ha suscitado desde hace un tiempo el interés de estudiosos y la notable ductilidad ha encontrado interés en diferentes sectores industriales. Los trabajos mayoritariamente seguidos con los materiales superplásticos son los relativos al conformado de las láminas.

Estos trabajos permiten obtener productos con buenas características mecánicas y con formas complejas, partiendo de una única lámina, cosa que no sería posible realizar con las técnicas de trabajo o conformado más convencionales. De hecho, para obtener geometrías complejas, con las técnicas consolidadas, se deberían llevar a cabo diferentes partes más simples, las cuales se ensamblan posteriormente, lo cual, reduce las propiedades mecánicas del componente final.



Utilizando las técnicas de conformado de las aleaciones superplásticas es posible obviar tales problemas. El conformado superplástico (SPF) requiere de mayores atenciones respecto a las tecnologías más comúnmente utilizadas en la industria. Para una velocidad de deformación que varía entre 10^{-5} a 10^{-3} [s^{-1}], se tiene una velocidad que varía en 1 a 10^2 [s^{-1}] en el caso de los procesos convencionales de conformado de las láminas. Por tanto, el SPF puede ser utilizado solo en aquellos sectores industriales en los que los tiempos de producción no influyan en el proceso.

De hecho, el SPF ya se utiliza desde hace tiempo en el campo aeroespacial, aeronáutico y naval. Algunos ejemplos de utilización de la tecnología SPF son:

- Paneles externos para vehículos navales, realizados con aleaciones de Al-Mg que sustituyen las láminas de acero, dando al producto final un peso menor, una mayor robustez, resistiendo a la corrosión y con unas buenas características de soldabilidad.
- Paneles para vehículos aeroespaciales, realizados con aleaciones de Ti-Al-V en sustitución de los convencionales, consiguiendo así una reducción del peso y un aumento de la resistencia.
- Piezas para la industria del automóvil, que sustituyen las partes realizadas con material plástico.
- Paneles para vehículos de transporte ferroviario.
- Piezas para la industria farmacéutica y médica.

En el estudio del conformado superplástico se afrontan los siguientes problemas, a continuación especificados, para los cuales se han iniciado actividades de investigación.

- Aparición de la rotura durante el proceso de conformado.
- No homogeneidad de los espesores finales.
- Largos tiempos de trabajo.
- Elevados costes.

A la aparición de la rotura durante el proceso de conformado y a los tiempos de producción, que representan en absoluto la problemática más seria y difícil de afrontar, se interviene identificando las propiedades de las distintas aleaciones superplásticas,

con el fin de determinar los límites de conformado y de establecer los parámetros operativos óptimos.

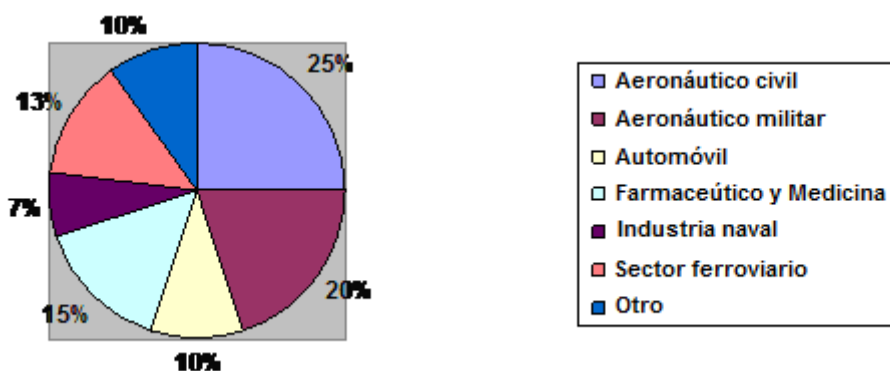


Figura 26. Cuotas porcentuales para algunos sectores de mercado de productos superplásticos

3.4.2 Características de los materiales superplásticos y nuevas aplicaciones

Las aleaciones metálicas superplásticas se consideran costosas. En particular, el precio de las aleaciones de Ti es 10-30 veces el del acero típico. Por esto, el incremento del rendimiento del material es muy importante en las operaciones SPF.

Una de las nuevas aplicaciones de la aleación de Ti sería su uso en productos para cocinar. Otra aplicación interesante en el SPF es el molde para la formación de objetos tridimensionales obtenidos a través de un proceso de fabricación en la industria del papel. Las fibras se depositan sobre una estructura en forma de red, modelada en dimensiones similares a las del objeto deseado. La estructura se combina normalmente a un soporte o apoyo realizado de bronce fundido pesado. La desventaja de los moldes clásicos es el peso, el mantenimiento diario de la estructura reticular construida, los largos tiempos de conformado y los altos costes.

3.4.3 Aplicaciones del conformado superplástico en aero motores

La **Figura 27** muestra las diferentes partes del motor donde técnicas de conformado superplástico (SPF) y difusión de uniones (DB) pueden ser usadas en aero motores para aviones civiles y militares.

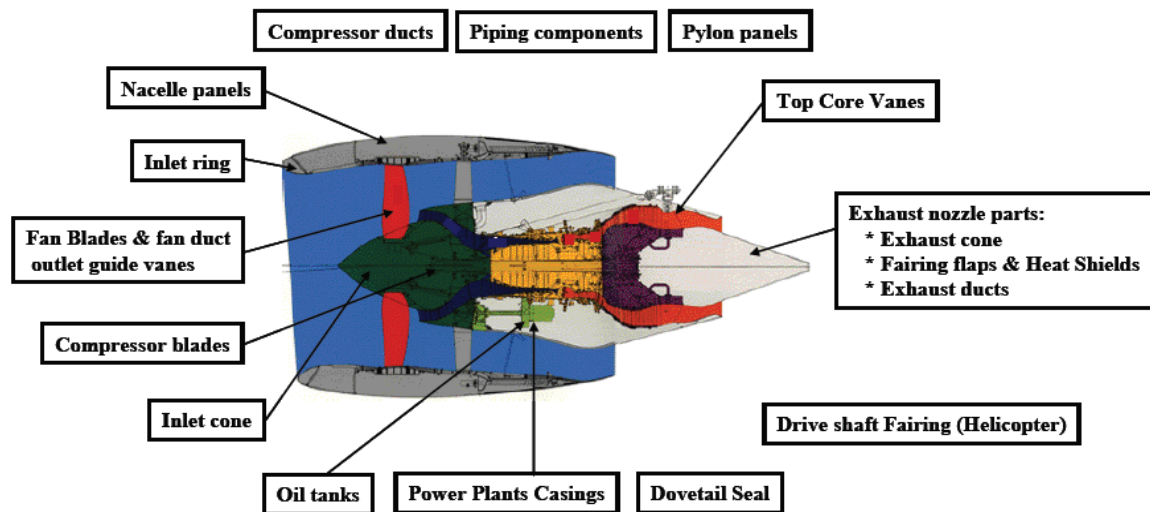


Figura 27. Partes de un motor de un avión donde existe la posibilidad de utilizar materiales superplásticos

Aleaciones de titanio como $Ti6Al4V$ y $Ti6Al2Sn4Zr2Mo$ y otras aleaciones de titanio son las más usadas en conformado de piezas superplásticas. Se utilizan principalmente para cubiertas y las partes calientes alrededor de los motores, como los paneles góndola, los paneles de pilón, el cono de entrada, los conductos de admisión de aire (TP400), anillo de entrada, marcos de las centrales eléctricas (TP400), compuertas, ejes de transmisión y cubiertas de sensores.

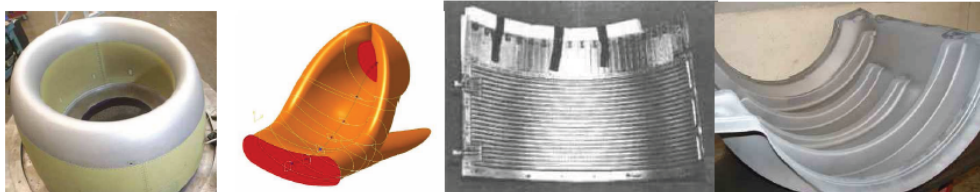


Figura 28. Anillo de entrada, conducto de entrada de aire (TP400) y paneles góndola

- Los conductos de tratamiento de aire caliente, como conductos compresores (Joint Strike Fighter)

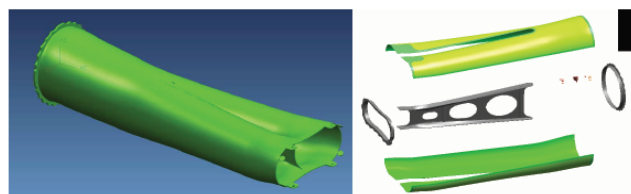


Figura 29. Conducto compresor de tratamiento de aire caliente

- Partes de escape de la boquilla como cono de escape (Dolsig I + D europea de programas RR B715), protectores de calor (P & WR100, EJ-200), los conductos de escape y atenuadores de ruido.



Figura 30. Cono de escape de TiAL (RR BR715)

- Componentes del motor, tales como las aspas del ventilador (RR Trent 900, RR Trent 1000, el IAE V2500), ventilador de paletas de salida del conducto guía, álabes del compresor, componentes de tuberías y depósitos de combustible y aceite (RR-BR725, EJ-200)



Figura 31. Aspas de ventilador y componente de tubería

Las aleaciones de aluminio, tales como 5083, sólo se utilizan en motores pequeños para los anillos de entrada. Por último, aleaciones de base níquel como el Inconel 718 están siendo estudiadas con el fin de ser aplicadas en las partes calientes del motor, especialmente para partes estructurales estáticas en la turbina como TBH'S y los intercoolers.

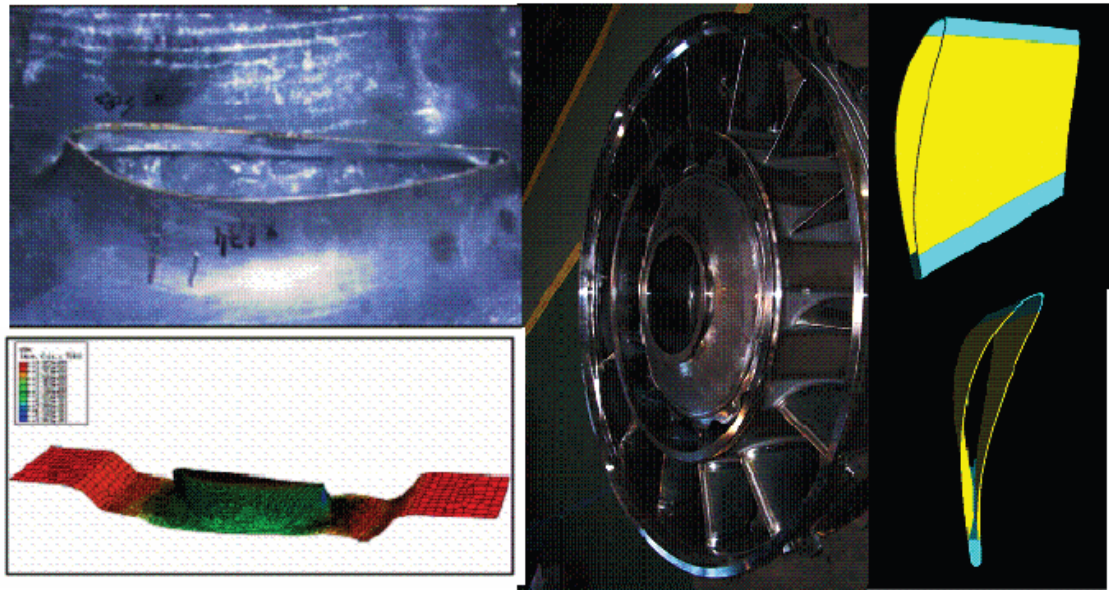


Figura 32. Algunos diseños preliminares

3.5 VENTAJAS FRENTE A LAS ALTERNATIVAS TRADICIONALES

El conformado superplástico (SPF) ofrece muchas ventajas con respecto a las operaciones de conformado convencionales:

- La capacidad para conformar componentes con formas muy complejas, que no pueden ser fabricadas por técnicas convencionales, o sólo se pueden obtener por múltiples conformados sucesivos seguidos por unión o soldadura de varias partes.
- La capacidad para dar forma a materiales muy difíciles de conformar, con relativa facilidad como son las aleaciones de titanio y magnesio bajo condiciones específicas.
- Bajo coste en matrices, ya que se necesita una matriz con una sola cavidad para conformar el componente, independientemente de la complejidad de la forma y de la relación de aspecto dimensional.
- El proceso se realiza en un solo paso, produciendo un buen acabado o un componente casi terminado.
- Reducción del número total de partes y, en consecuencia, el número de fijaciones y/o uniones, lo que conlleva a la mejora de la seguridad en determinadas aplicaciones (por ejemplo, el sector aeroespacial).



- Mayor flexibilidad de diseño y control dimensional.

La técnica de SPF se ha enfrentado a una serie de retos y problemas que impiden su uso generalizado a mayor escala. Las costosas operaciones de pre-conformado, como la preparación de los materiales con estructura de grano fino y el calentamiento a la temperatura de conformado deseada, representan algunas de estas cuestiones. Además, debido a que la velocidad está controlada y limitada, a velocidades bajas, hace el proceso relativamente lento y desfavorable para aplicarlo en la producción de un alto volumen de componentes de automoción. Sin embargo, la técnica proporciona una herramienta única para conformado de aleaciones ligeras, y, a pesar de los obstáculos y desafíos en el camino, todavía ofrece notables ventajas y méritos sobre las técnicas de conformado convencionales.



4. ALEACIONES SUPERPLÁSTICAS

Debido a los requerimientos de tamaño estable del grano para un metal superplástico, no todas las aleaciones comerciales disponibles son superplásticas. De hecho, muy pocas de estas aleaciones son superplásticas. Muchos materiales han sido producidos en laboratorio, pero muy pocos de ellos han sido producidos comercialmente. No obstante, hay algunas aleaciones que pueden ser obtenidas, o que puede esperarse estén disponibles en un futuro, que pueden ser mencionadas. Se espera que, según se desarrollen las tecnologías SPF, haya aleaciones adicionales producidas específicamente para este proceso.

Un resumen de numerosas aleaciones superplásticas se presenta en la **Tabla 1**, junto con algunas de sus características. Particularmente notables son la Ti-6Al-4V, 7475 Al, y las súper aleaciones que tienen muy buenas propiedades superplásticas y están disponibles comercialmente. Las aleaciones de Titanio han resultado ser superplásticas tal y como se producen de la manera convencional, y no ha habido necesidad de desarrollar modificaciones ni métodos especiales de procesamiento para hacerlas superplásticas. Sin embargo, este no ha sido el caso con las aleaciones de Aluminio, ya que ha sido necesario tanto un procesamiento especial, como el desarrollo de aleaciones, para producir materiales superplásticos. La Zn-22Al es una aleación que ha sido objeto de numerosas investigaciones, puesto que puede ser procesada con condiciones superplásticas. Esta aleación ha sido también puesta en el mercado por diversos distribuidores.

Como consideraciones importantes en la selección y uso de aleaciones superplásticas están la capacidad total de alargamiento, la estabilidad de la microestructura superplástica a elevadas temperaturas, el valor de la velocidad de deformación por encima del cual se observa la superplasticidad, y la velocidad de desarrollo de cavitación durante la deformación superplástica. Todos estos factores pueden cambiar de un lote a otro del material, y es generalmente recomendable comprobar para cada lote las propiedades superplásticas así como las propiedades de diseño.



4. ALEACIONES SUPERPLÁSTICAS

En resumen, podemos decir que entre los materiales superplásticos de interés industrial, los más relevantes son las aleaciones a base de aluminio y las aleaciones a base de titanio.

Con el objetivo de que estas aleaciones puedan presentar, bajo oportunas condiciones, un comportamiento superplástico, se debe garantizar una microestructura cristalina fina y estable durante la deformación.

Estas características se pueden obtener preparando la lámina con tratamientos térmicos previos, o bien con *tratamientos mecánicos*.

Entre las aleaciones más utilizadas, se deben citar, la aleación Ti-6Al-4V, la aleación Al7475 y la aleación supral (Al-Cu-Zr).

Aleación	Temperatura del ensayo [°C]	Velocidad de deformación [s ⁻¹]	Índice de sensibilidad a la velocidad de deformación	Elongación [%]
Al-33Cu	400 – 500	8×10^{-4}	0.8	400 – 1000
Al-4.5Zn-4.5Ca	550	8×10^{-3}	0.5	600
Al-6a10Zn-1.5Mg-0.2Zr	550	10^{-3}	0.9	1500
Al-5.6Zn-2Mg-1.5Cu-0.2Cr (7475)	516	2×10^{-4}	0.8 – 0.9	800 – 1200
Al-6Cu-0.5Zr (Supral100)	450	10^{-3}	0.3	1000
Al-6Cu-0.35Mg-0.14Si (Supral220)	450	10^{-3}	0.3	900
Al-4Cu-3Li-0.5Zr	450	5×10^{-3}	0.5	900
Al-3Cu-2Li-1Mg-0.2Zr	500	1.3×10^{-3}	0.4	878
Ti-6Al-4V	840 – 870	1.3×10^{-4} - 10^{-3}	0.75	750 – 1170
Ti-6Al-5V	850	8×10^{-4}	0.70	700 – 1100
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	900	2×10^{-4}	0.67	538
Ti-4.5Al-5Mo-1.5Cr	971	2×10^{-4}	0.63-0.81	>510
Ti-6Al-4V-2Ni	815	2×10^{-4}	0.85	720



4. ALEACIONES SUPERPLÁSTICAS

Ti-6Al-4V-2Co	815	2×10^{-4}	0.53	670
Ti-6Al-4V-2Fe	815	2×10^{-4}	0.54	650
Ti-5Al-2.5Sn	1000	2×10^{-4}	0.49	420
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	815	2×10^{-4}	0.5	229
Ti-13Cr-11V-3Al	800	—	—	<150
Ti-8Mn	750	—	0.43	150
Ti-15Mo	800	—	0.60	100

Tabla 1. Algunas características de algunas aleaciones superplásticas de Ti y Al

4.1 ALEACIONES PBSN

Dentro de las aleaciones de PbSn, a continuación se comentarán algunas de las características de la aleación PbSn60, empleada para realizar el presente estudio.

Se trata de una aleación no ferrosa constituida de un 60% en peso de plomo y por el restante 40% de estaño, disponible comercialmente bajo forma de barras, y denominada con la sigla PbSn60.

La elección de este material ha venido motivada por razones económicas, de hecho, resulta superplástica a temperatura ambiente, al contrario que otros materiales que, mostrando superplasticidad a temperaturas más altas, requieren el uso de equipos muchos más costosos que los empleados en este estudio. Tal característica resulta ventajosa solo desde el punto de vista académico, puesto que industrialmente no es posible utilizar la aleación para la realización de componentes, ya que, aunque siendo superplástica a temperatura ambiente, presenta una muy baja resistencia mecánica. Como todas las aleaciones de Plomo-Estaño, posee las siguientes propiedades:

- Elevado peso específico.
- Buena resistencia a los agentes corrosivos y a los ácidos.
- Óptima conformabilidad a temperatura ambiente, la cual permite la laminación en láminas sutiles.
- Bajo coste.



4. ALEACIONES SUPERPLÁSTICAS

La **Tabla 2** muestra algunas propiedades físicas y mecánicas de la aleación PbSn60 y del Pb y del Sn a temperatura ambiente:

		PbSn60	Pb	Sn
Composición química	Pb [% en peso]	60	99.99	-
	Sn [% en peso]	40	-	99.99
Propiedades físicas	Temperatura de fusión [K]	456	598.6	504.9
	Conductividad térmica a 293 K [W/mK]	50.24	33.49	66.99
	Coefficiente de dilatación térmica [$10^6/^{\circ}\text{C}$]	24.7	29	23
	Peso específico [g/cm^3]	8.4	11.34	7.3
Propiedades mecánicas	Carga de rotura [N/mm^2]	53	18	16
	HB 10/100 30''	14	4	4

Tabla 2. Características de la aleación PbSn60 y del Pb y Sn puros a temperatura ambiente

De las características mostradas, cabe resaltar como la presencia del Sn provoca en la aleación un aumento de la resistencia y una disminución de la temperatura de fusión.



5. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

5.1 HISTORIA DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El método de los Elementos Finito o Finite Element Analysis (FEA) es un método numérico que surgió como tal en la década de los 60's. Sin embargo, su forma más conceptual fue propuesta por Isaac Newton dentro de las bases del cálculo integral diferencial. Desde entonces se ha convertido en una de las herramientas más novedosas tanto a nivel académico como industrial. El método fue propuesto en 1943 para un uso estructural, ya que se podían representar elementos como vigas y sólidos sujetos a esfuerzos.

No fue hasta 10 años después cuando se obtuvieron resultados satisfactorios, puesto que se extendieron los alcances y aplicaciones de este método para resolver problemas tridimensionales con el desarrollo de matrices de rigidez tetraédricas. En esta etapa, la modelación matemática se enfocaba únicamente en deformaciones elásticas, concentración de esfuerzos con cargas estáticas y desplazamientos cortos.

En 1964 finalmente se pudieron incluir dentro del análisis de elementos finitos, los análisis térmicos y deflexiones de gran magnitud. Un año después se comenzaron a aplicar los análisis dinámicos con los cuales se exploraron los campos de flujo y conducción de calor.

Actualmente infinidad de empresas hacen uso de esta metodología para poder ofrecer a los consumidores mejores productos. El beneficio no es únicamente para los compradores, ya que las empresas logran reducir costes y elaborar productos más fiables y eficientes.

5.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

La simulación de procesos es una de las mejores herramientas de la ingeniería, la cual se utiliza para representar un proceso mediante un modelo simplificado. Esta simulación, en algunos casos es casi indispensable, debido a que en algunas



5. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

disciplinas que utilizan con mayor frecuencia este tipo de metodología (campo de la física, matemáticas o ingeniería), no es posible obtener soluciones analíticas a partir de expresiones matemáticas.

Una solución analítica es aquella expresión matemática que arroja resultados con determinadas incógnitas que requieren la solución de ecuaciones diferenciales, las cuales, debido a su complejidad, son imposibles de resolver. Sin embargo, gracias a este tipo de metodologías, es posible plantear el problema como una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas, en lugar de utilizar una resolución a partir de ecuaciones diferenciales complejas.

Actualmente, el análisis de un elemento mecánico se puede llevar a cabo mediante la forma clásica, o mediante la utilización de un método computerizado de elementos finitos.

La diferencia principal entre el método clásico y el de elementos finitos, es la forma en que éstos perciben la estructura durante el procedimiento para llegar a la solución. Los métodos clásicos consideran la estructura como *un continuo*, cuyo comportamiento queda descrito por ecuaciones diferenciales ordinarias. El método de los elementos finitos considera la estructura como un ensamblaje de pequeños elementos de tamaño finito. El comportamiento de los elementos y de la estructura global es obtenido formulando un sistema de ecuaciones algebraicas que pueden ser rápidamente resueltas con un computador.

Los elementos de tamaño finito son llamados elementos finitos, o simplemente elementos. Los puntos donde éstos están interconectados se conocen como nodos o puntos nodales, y el procedimiento para seleccionar los nodos se denomina discretización o modelado.

El método de los elementos finitos es un método numérico, generalmente empleado para la resolución de problemas con alto grado de dificultad, ya que involucran geometrías complejas, determinación de las propiedades de los materiales y cargas no distribuidas. Este análisis es un método computerizado para predecir como un objeto real reaccionará a fuerzas, calor, vibración, flujo de fluidos, fenómenos eléctricos y



5. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

magnéticos, entre otros. En términos generales, se refiere a si este romperá, fallará, o trabajará como fue diseñado.

El concepto básico de FEA es el de dividir el continuo en un número finito de elementos. Esto se traduce en discretizar el continuo y resolver cada uno de los elementos de las ecuaciones del sistema para después ensamblar la solución total.

Se entiende por discretizar al proceso de modelización de un cuerpo que consiste en la división equivalente del mismo, en un sistema compuesto de cuerpos más pequeños, a los cuales se denomina elementos finitos. Estos, están interconectados por medio de puntos comunes o nodos, los cuales forman superficies que se comportan como volúmenes de control independientes. En el análisis de elementos finitos no se intenta resolver el problema como si fuese una sola pieza, por el contrario, se subdivide el elemento en un número finito de elementos, que a su vez, arrojan resultados individuales. Éstos se fusionan (ensamblaje) para generar *una sola solución*.

Dentro de la Ingeniería Mecánica, las aplicaciones en la Mecánica de Sólidos pueden agruparse en dos grandes familias:

- La de los problemas asociados con sistemas discretos.
- La de los problemas asociados con sistemas continuos.

En los primeros sistemas lo que se analiza está dividido de forma natural, es decir, en elementos claramente definidos. En el segundo caso, el sistema no puede ser dividido de forma natural en unidades simples, por lo que su análisis resulta mucho más complejo, por esta razón, es necesario emplear el FEA.

El comportamiento mecánico de cada elemento en los que se subdivide el elemento analizado queda definido por un número finito de parámetros llamados grados de libertad, asociados a los puntos que en dicho momento se unen al resto de los elementos de su entorno (conocidos dichos puntos de unión como nodos). Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los nodos (a través de una adecuada función de interpolación).



5. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

En el método de los elementos finitos son esenciales los conceptos de discretización (o acción de transformar la realidad de la naturaleza continua en un modelo discreto aproximado) y de interpolación (o acción de aproximar los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos). Por lo tanto, éste es un método aproximado desde múltiples perspectivas.

Esta representación aproximada de la realidad en forma de modelo numérico, permite la resolución del problema. Los diversos coeficientes del modelo son automáticamente calculados por el ordenador a partir de la geometría y propiedades físicas de cada elemento. Sin embargo, queda en manos del usuario decidir hasta que punto la discretización utilizada en el modelo representa adecuadamente el modelo de la estructura. La discretización correcta depende de diversos factores como son el tipo de información que se desea extraer del modelo, o el tipo de solicitud aplicada. Actualmente, el método de los elementos finitos ha sido generalizado hasta constituir un potente método de cálculo numérico.

5.3 ESTRUCTURA Y FUNCIONES DE UN PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS

Un programa de elementos finitos es un software complejo en el que interactúan numerosas operaciones. Por este motivo suelen estar divididos en segmentos, de los cuales cada uno efectúa una operación determinada. Sin embargo, el programa no solamente se limita al cálculo de algoritmos. La generación de los datos y el análisis de los resultados numéricos, que aparecen como producto del cálculo, son esenciales para concluir el análisis satisfactoriamente.

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se dividen en:

- **Preproceso.** Consiste en la definición de geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones existen operaciones de regularización de la malla para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.



5. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

- **Cálculo.** El resultado del preproceso en un problema simple no dependiente del tiempo, permite generar un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no lineal, o un problema dependiente del tiempo, a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.
- **Postproceso.** En él se incluye la preparación de datos, se generan los archivos de resultado, y finalmente este post-procesador facilita el análisis e interpretación de los resultados obtenidos. En general, de forma gráfica mediante el trazado de curvas, gráficos tridimensionales, tablas, etc.

6. SOFTWARE MARC MENTAT

En este capítulo, se van a mostrar dos ejemplos de aplicación con explicaciones detalladas para ilustrar el uso del programa MARC Mentat.

6.1 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

6.1.1 EJEMPLO 1: *Análisis elástico lineal estructura 3D*

En este ejemplo se creará un mallado de un modelo en 3D, y se añadirán las condiciones de contorno, propiedades del material, etc. Después se efectuará un análisis e interpretación de los resultados.

La estructura que se va a analizar tiene la siguiente configuración geométrica, como se muestra en la **Figura 33**.

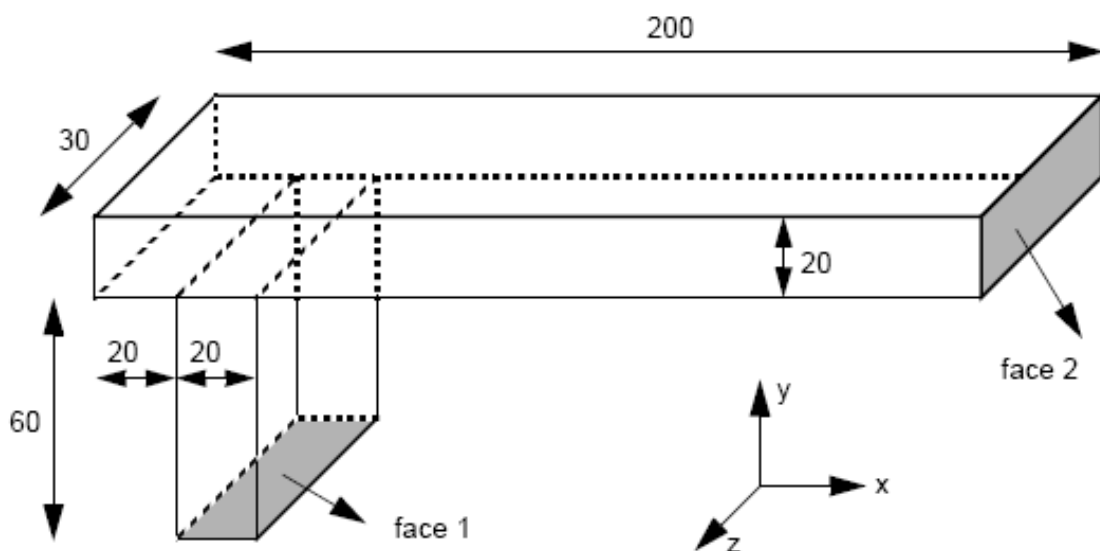


Figura 33. Configuración geométrica del problema

Condiciones de contorno:

- face 1: anclada

- face 2: cargada por una fuerza por unidad de área de magnitud 40, dirección $[0 \ 1 \ -1]^T$.

Propiedades del material:

- Módulo de Young: $E=4 \times 10^5$
- Módulo de Poisson: $\nu=0.3$

Pasos a seguir:

Paso 1: Generación del mallado, MESH GENERATION.

Paso 2: Condiciones de contorno, BOUNDARY CONDITIONS.

Paso 3: Propiedades del material, MATERIAL PROPERTIES.

Paso 4: Propiedades geométricas, GEOMETRIC PROPERTIES.

Paso 5: Lanzar el caso, JOBS.

Paso 6: Resultados, RESULTS.

Paso 1: Generación del mallado, MESH GENERATION.

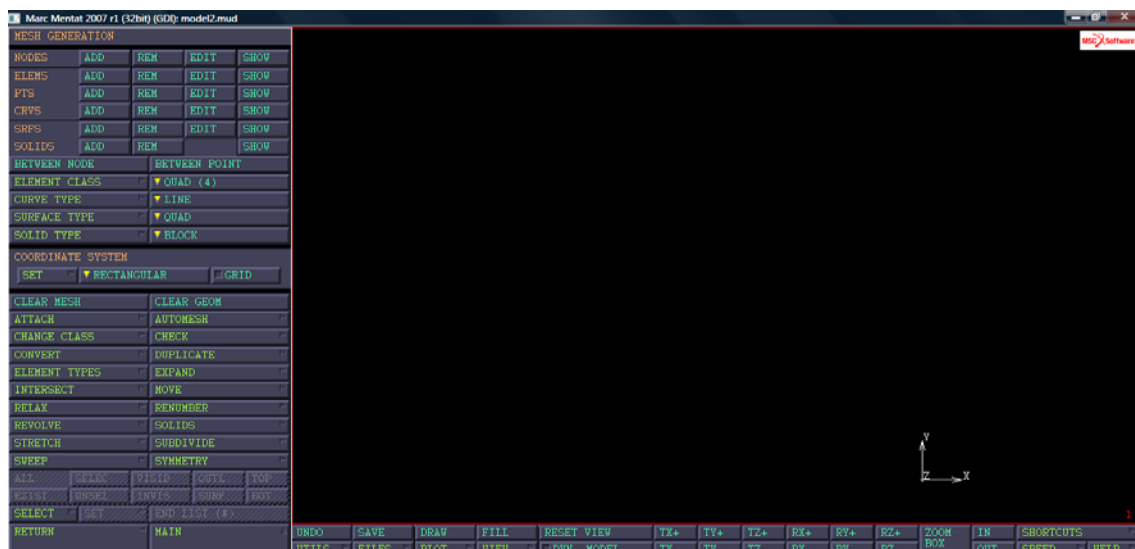


Figura 34. Menú creación del mallado

Empleamos los comandos SET, GRID, para introducir las coordenadas de manera sencilla, y después la vista FILL para centrar la imagen de pantalla.

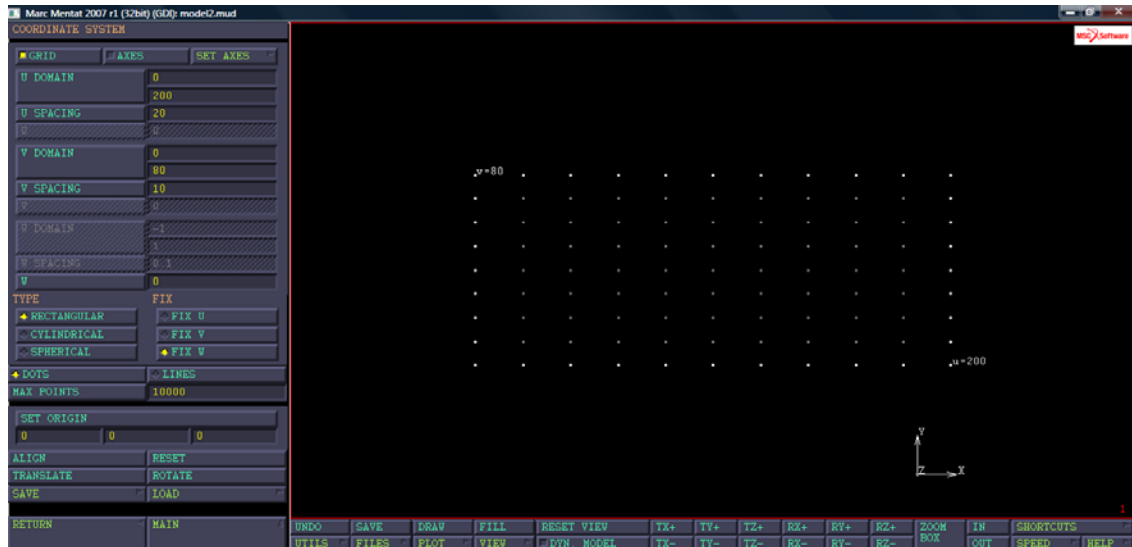


Figura 35. Creación del mallado. Uso del comando grid

COORDINATE SYSTEM: SET GRID ON

U DOMAIN

0 200

U SPACING

20

V DOMAIN

0 80

V SPACING

10

FILL

RETURN

A continuación, se crean los puntos (entidades geométricas), apagamos el grid, y de nuevo centramos la vista con el comando FILL.

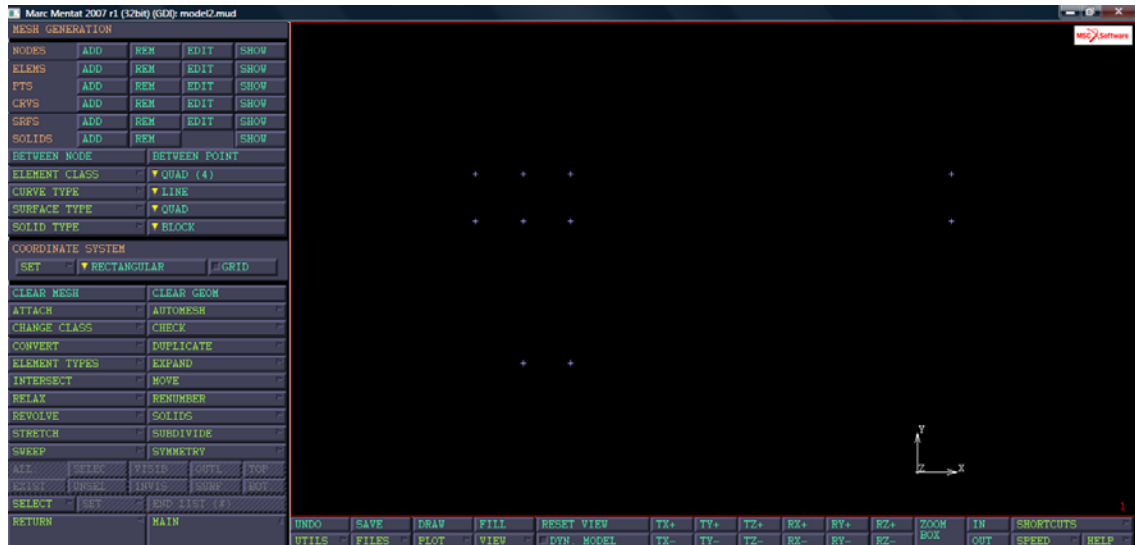


Figura 36. Menú creación del mallado. Añadir puntos

POINTS: ADD

(Para ir añadiendo los puntos hacemos click con el ratón)

(0,80,0)

(20,80,0)

(40,80,0)

(0,60,0)

(20,60,0)

(40,60,0)

(20,0,0)

(40,0,0)

(200,80,0)

(200,60,0)

COORDINATE SYSTEM: SET GRID OFF

FILL

Después se crean las superficies cuadrangulares (entidades geométricas).

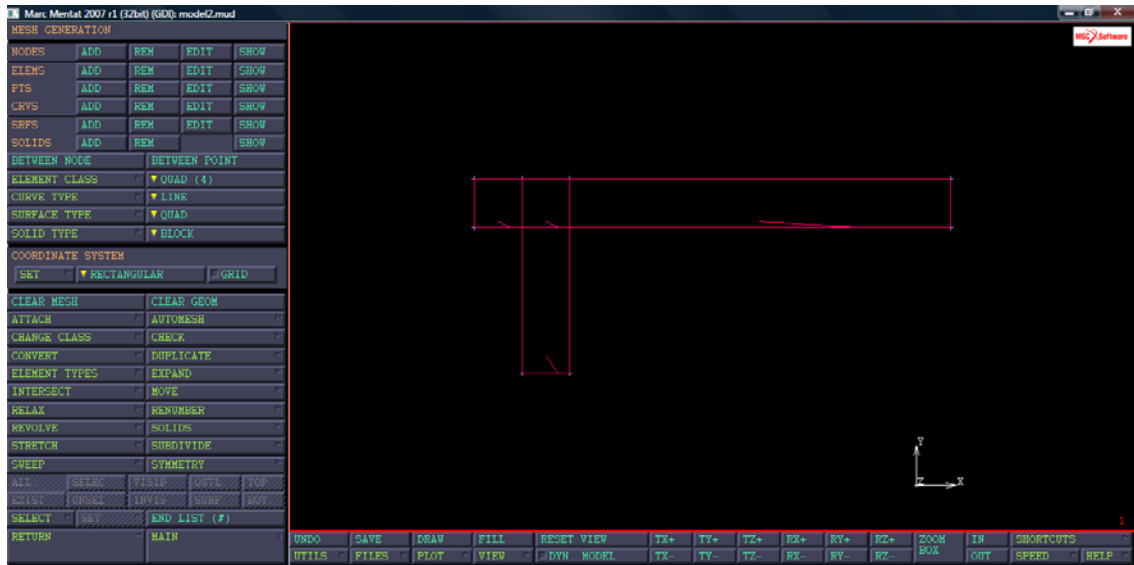


Figura 37. Creación de Superficies

SURFACES: ADD

(Pinchando en los puntos donde queremos que estén las esquinas de las superficies. Así obtenemos superficies tipo quad. Una media punta de flecha se usa para indicar el primer lado de la superficie).

Después hay que convertir las superficies en elementos (entidades de malla).

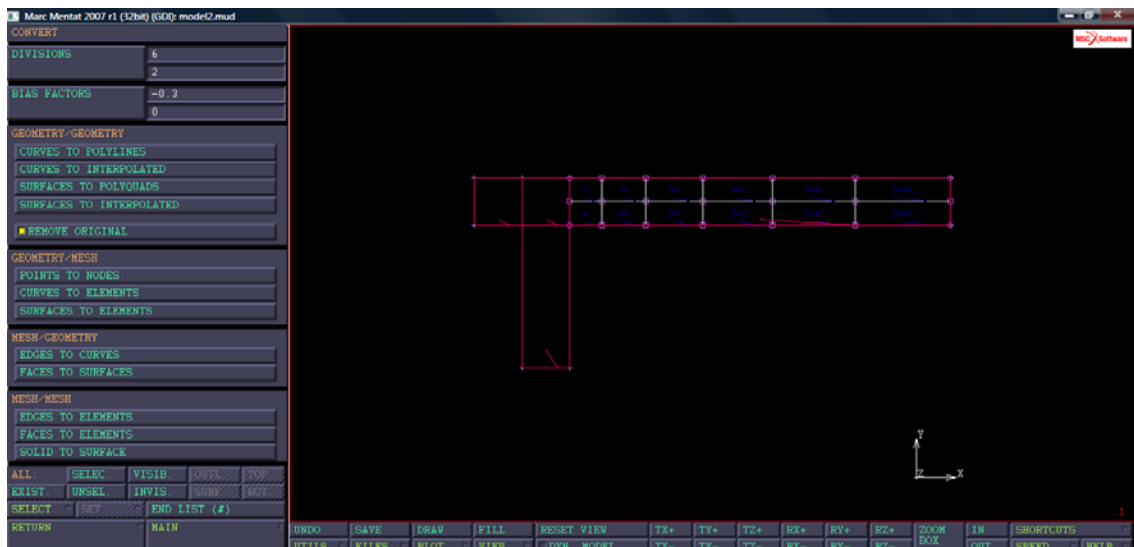


Figura 38. Conversión de las superficies en elementos



CONVERT

DIVISIONS

6 2

BIAS FACTORS

-0.3 0

SURFACES TO ELEMENTS (pinchar en la superficie que está más por encima)

DIVISIONS

2 2

BIAS FACTORS

0 0

SURFACES TO ELEMENTS (pinchar en las 2 superficies pequeñas)

DIVISIONS

2 3

SURFACES TO ELEMENTS (pinchar en la superficie inferior)

RETURN

Modificamos después la tolerancia del SWEEP y usamos dicha opción para fusionar los nodos coincidentes.

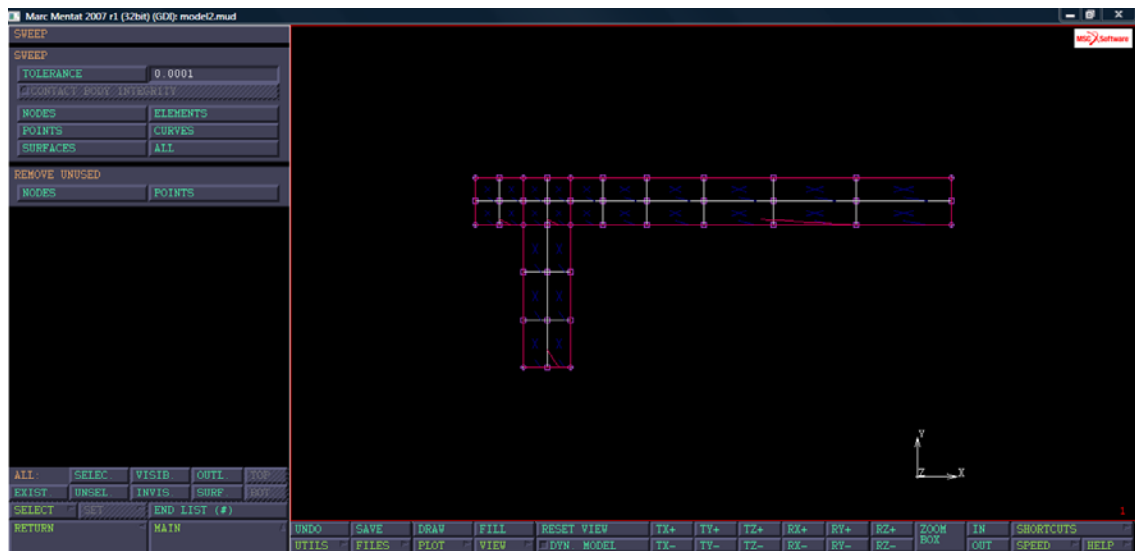


Figura 39. Empleo del comando SWEEP para fusionar los nodos duplicados.

SWEEP

TOLERANCE

0.001



SWEEP: NODES

ALL: EXIST.

RETURN

Usamos después, la opción RENUMBER para obtener una numeración consecutiva.

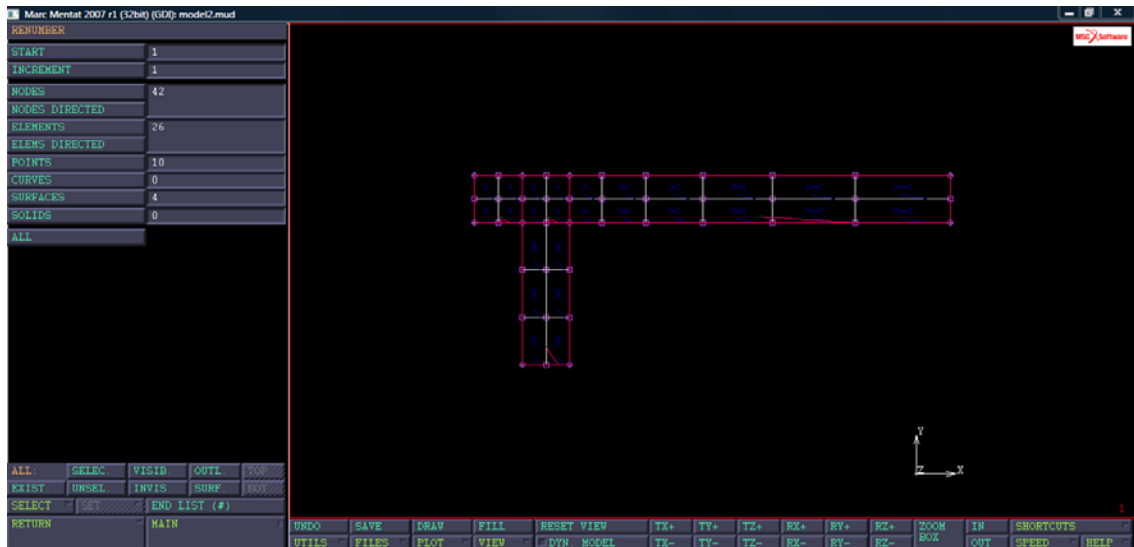


Figura 40. Renumeración de los nodos

RENUMBER: ALL

RETURN

Es necesario usar la opción EXPAND para expandir la malla en la dirección z.

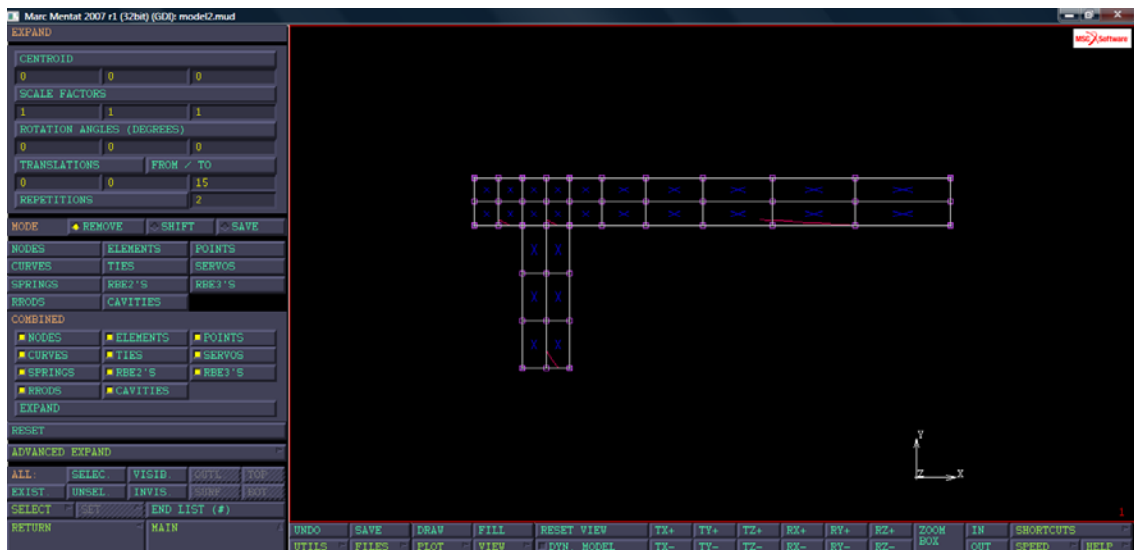


Figura 41. Eliminación de los elementos originales

EXPAND

TRANSLATIONS

0 0 15

REPETITIONS

2

MODE: REMOVE

(no hay que modificar nada, es la opción por defecto)

ELEMENTS

ALL: EXISTING

RETURN

Se eliminan así los nodos no usados y se vuelen a renumerar con el comando RENUMBER.

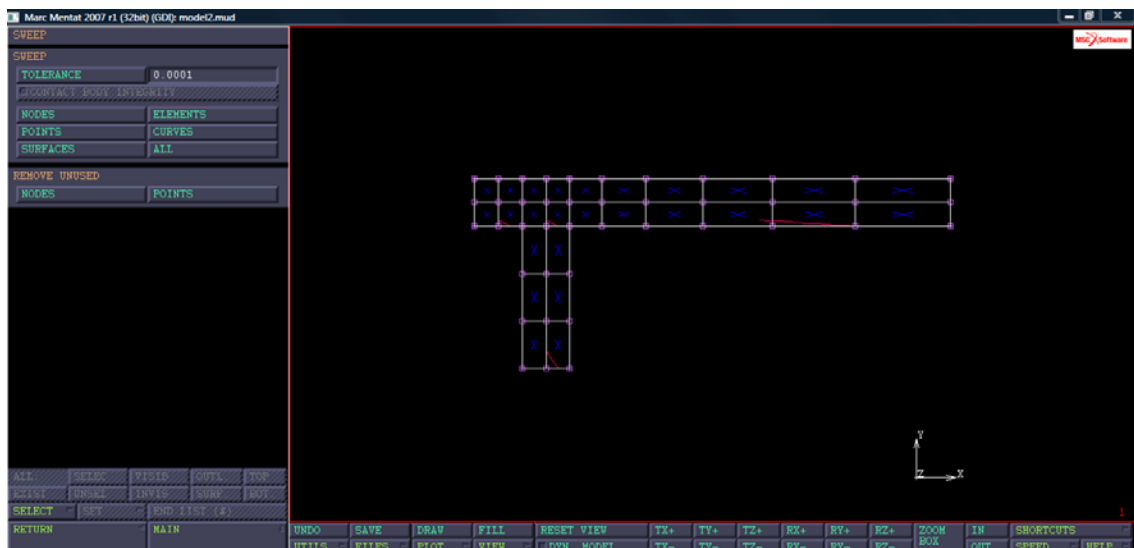


Figura 42. Eliminación de los nodos no usados y sucesiva renumeración con el comando RENUMBER

SWEEP

REMOVE UNUSED: NODES

SWEEP: ALL

RETURN

RENUMBER: ALL

RETURN

Mostramos a continuación la vista 4, y a continuación la centramos (FILL).

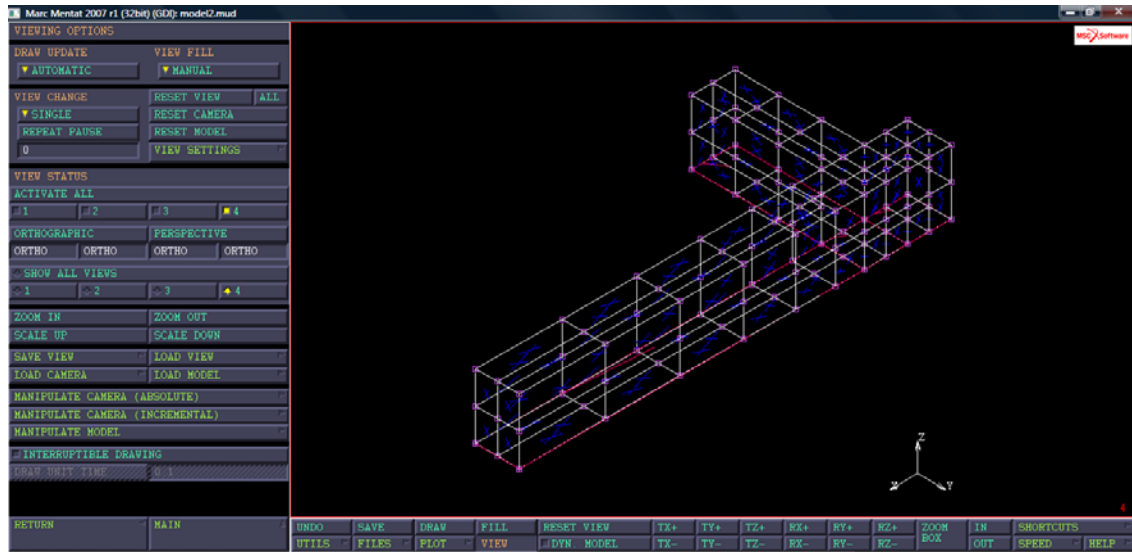


Figura 43. Opciones de visualización

VIEW

SHOW VIEW

4

FILL

A continuación, definimos los incrementos de rotación del modelo, para rotarlo de manera controlada.

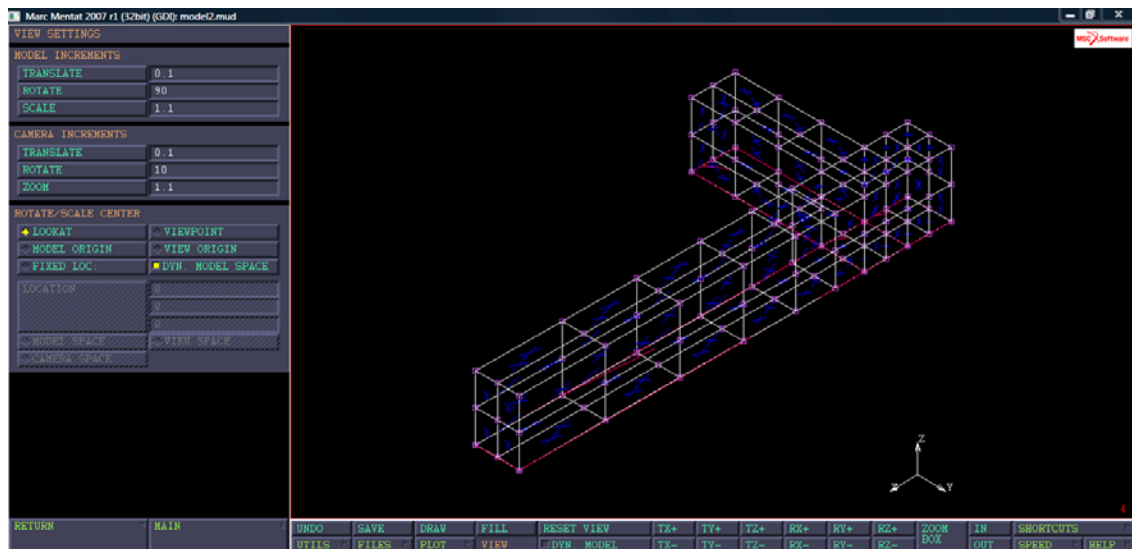


Figura 44. Opciones de visualización. Definición de los incrementos de rotación del modelo



VIEW SETTINGS

MODEL INCREMENTS: ROTATE

90

RETURN

Rotamos el modelo en dirección positiva, en torno al eje x e y, centrando la vista (FILL).

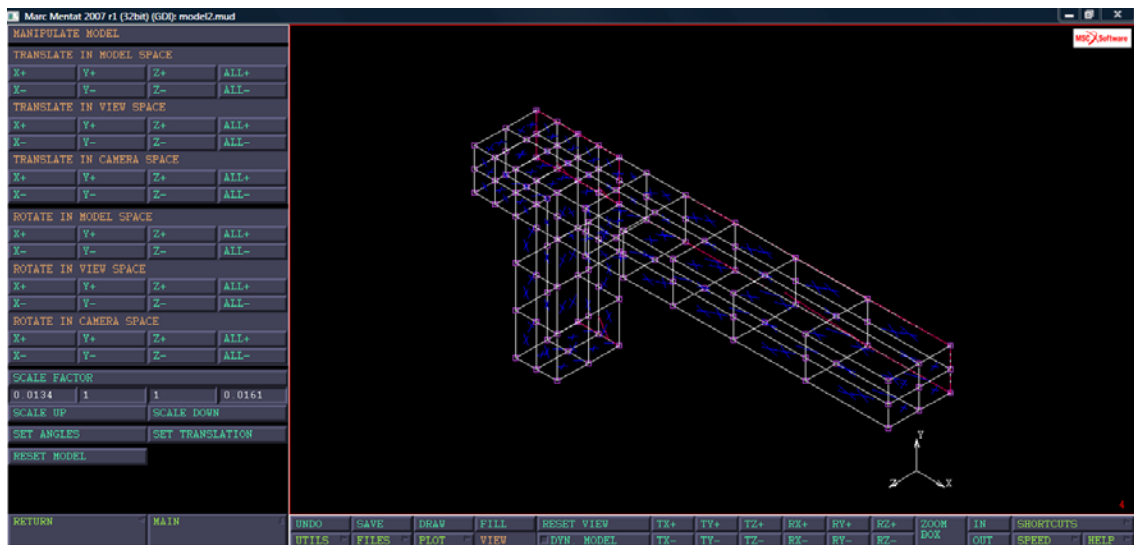


Figura 45. Rotaciones del modelo

MANIPULATE MODEL

ROTATE IN MODEL SPACE:

X+

ROTATE IN MODEL SPACE

Y+

FILL

Graficamos los elementos en modo sólido y desactivamos la opción de mostrar las entidades geométricas en el dibujo.

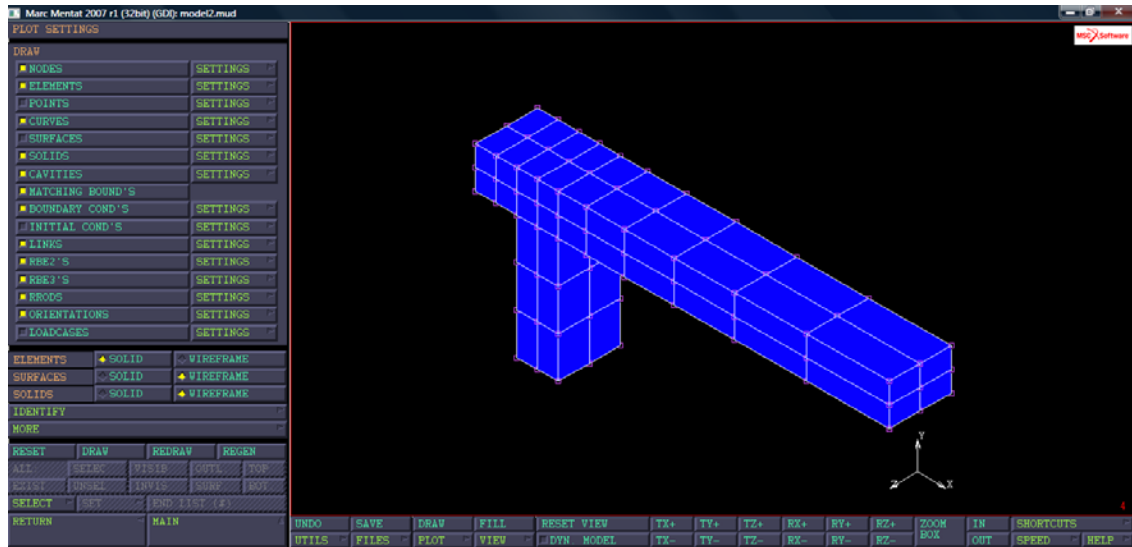


Figura 46. Desactivación de la visualización de ciertos elementos.

PLOT

desactivamos POINTS y SURFACES

ELEMENTS: SOLID

REDRAW

SAVE

MAIN

Paso 2: Condiciones de contorno, BOUNDARY CONDITIONS.

Vamos al menú principal y seleccionamos la opción de condiciones de contorno.

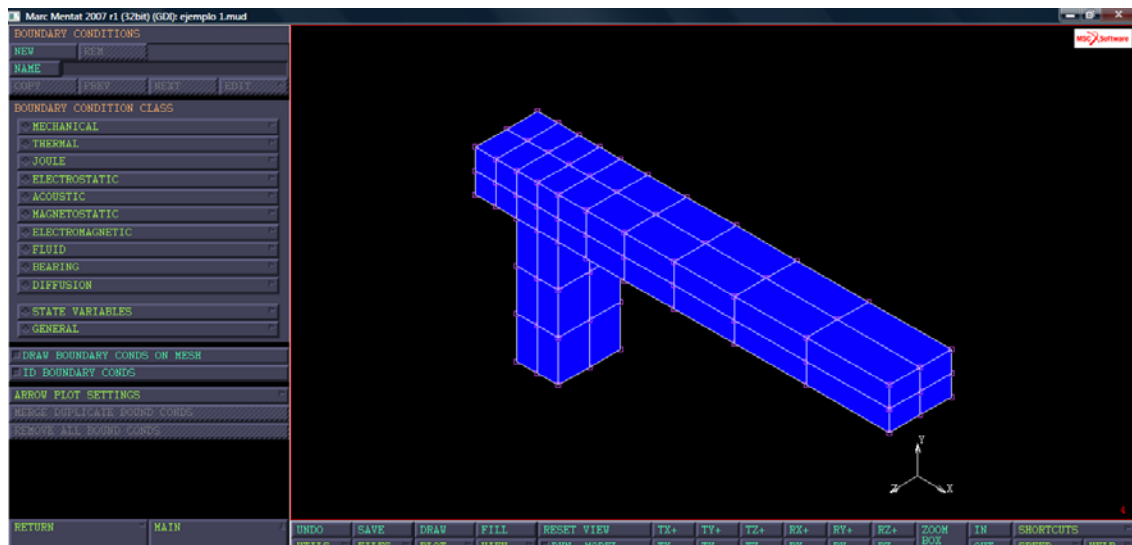


Figura 47. Condiciones de contorno

BOUNDARY CONDITIONS

MECHANICAL

Escogemos condiciones de contorno mecánicas (Mechanical boundary conditions) y restringimos desplazamientos (fixed displacements).

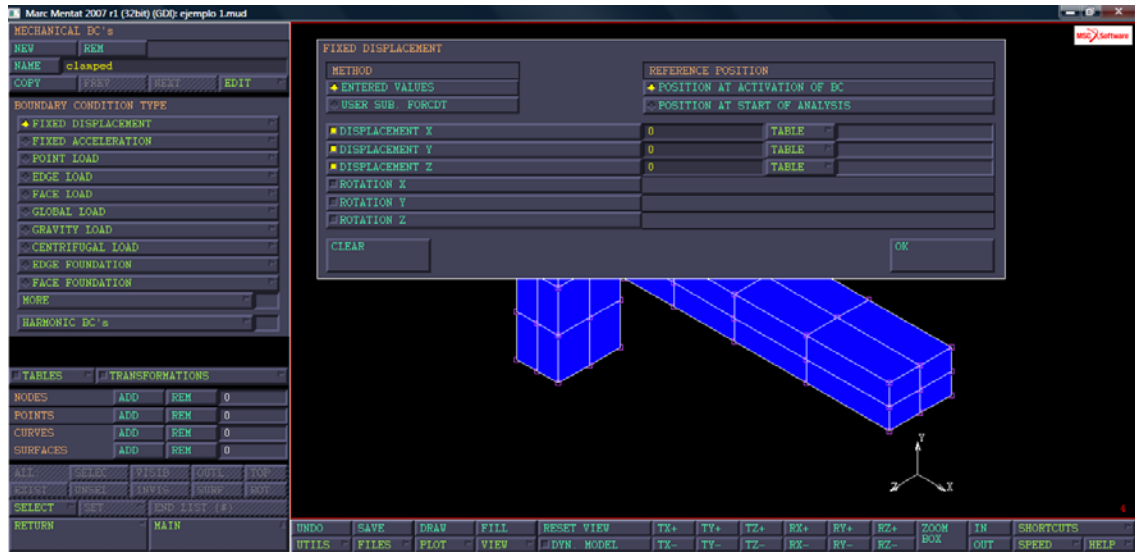


Figura 48. Restricción de desplazamientos imponiendo las condiciones de contorno

NEW

NAME

clamped

FIXED DISPLACEMENT

ON

X DISPLACE

ON

Y DISPLACE

ON

Z DISPLACE

Cambiando a la vista 1 seleccionamos los nodos apropiados.

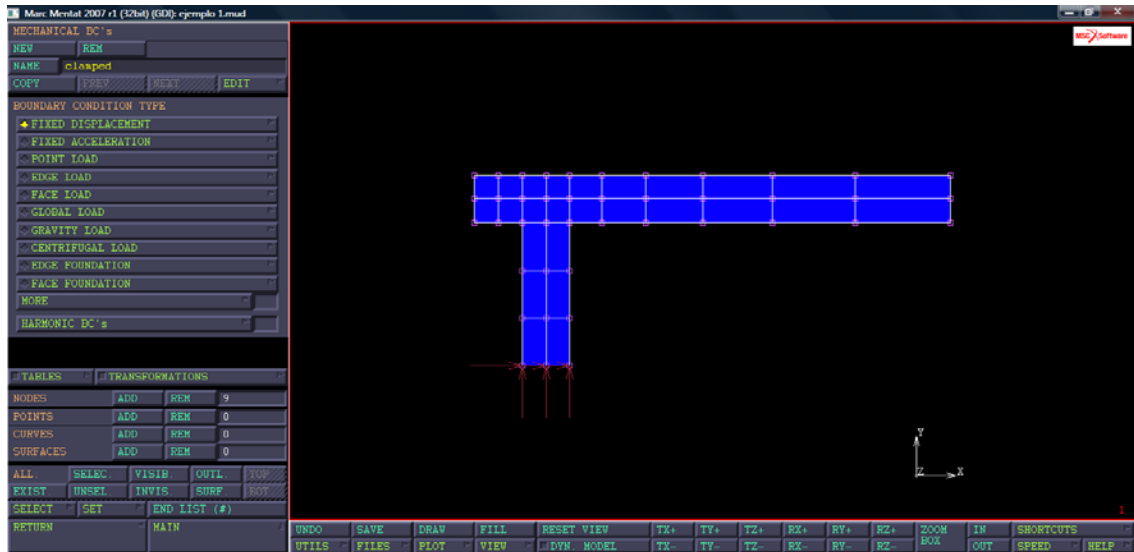


Figura 49. Condiciones de contorno mecánicas

VIEW

SHOW VIEW

1

RETURN

NODES: ADD

(añadir nodos seleccionándolos)

END LIST

(para terminar el comando "end list", usar el botón derecho del ratón, haciendo click en el área del gráfico)

Cambiar a la vista 4, definir las condiciones de contorno mecánicas (mechanical boundary conditions), y después el tipo de carga, que es de superficie (face loads).

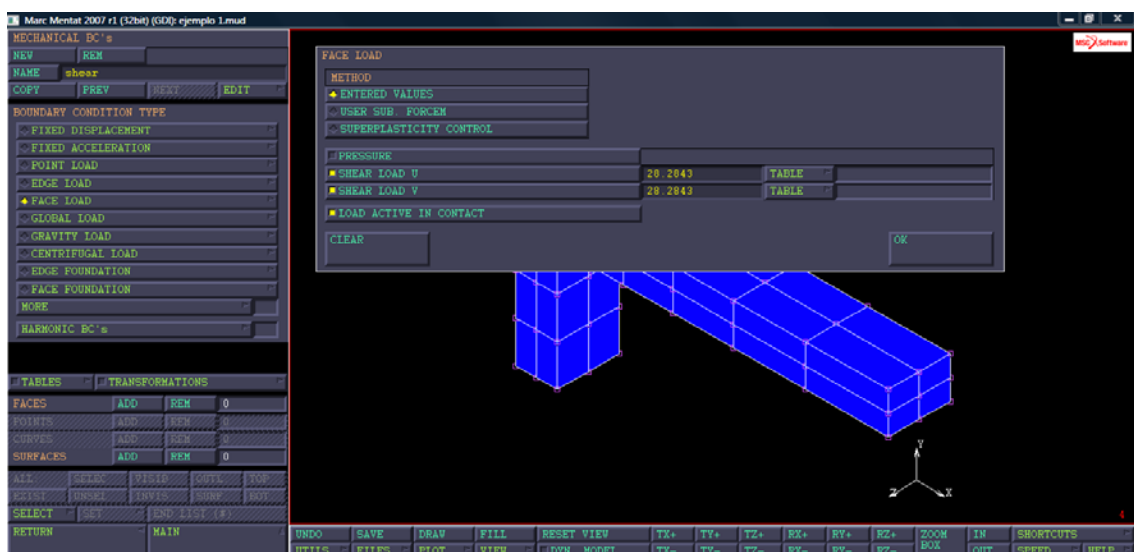


Figura 50. Condiciones de contorno. Imposición de la carga de superficie (face load)



VIEW

SHOW VIEW

4

RETURN

NEW

NAME shear

FACE LOAD

U SHEAR

28.2843

V SHEAR

28.2843

OK

Hacemos zoom localmente y seleccionamos las caras apropiadas de los elementos.

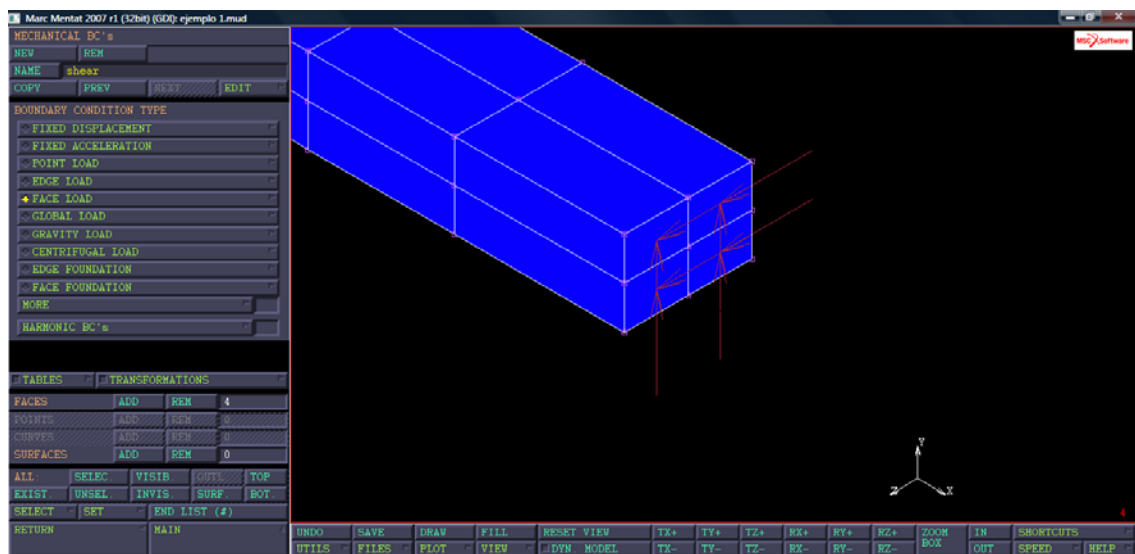


Figura 51. Carga de superficie aplicada sobre una cara de la pieza

ZOOM

(aumentamos zoom en la parte derecha de la estructura)

FACES: ADD

(añadimos las caras apropiadas pinchando con el ratón)

END LIST

RETURN

Así, la vista general de las condiciones de contorno quedará de la siguiente manera.

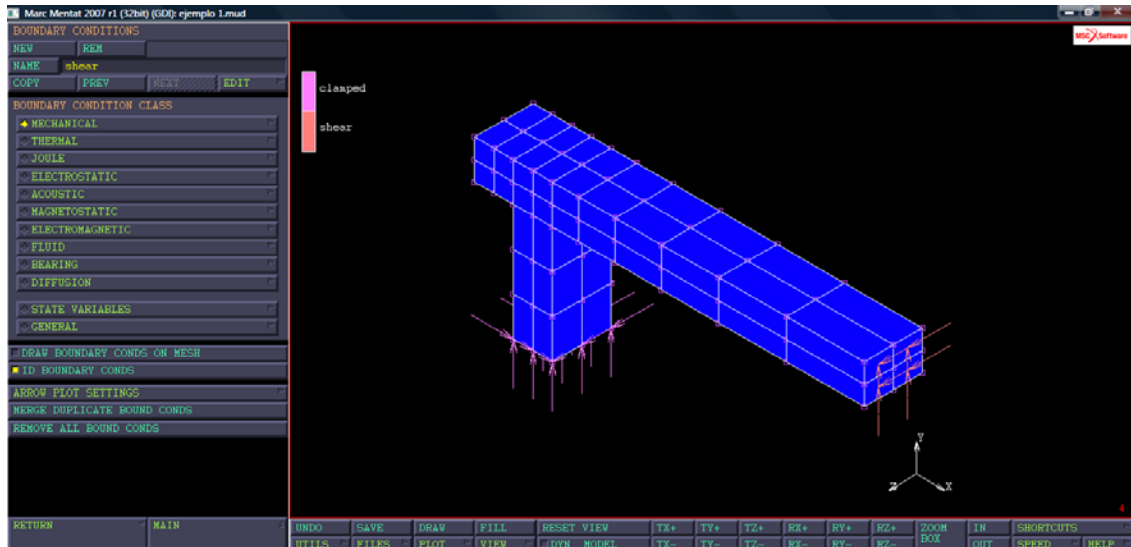


Figura 52. Opción mostrar condiciones de contorno

ID BOUNDARY CONDITIONS

FILL

SAVE

MAIN

Paso 3: Propiedades del material, MATERIAL PROPERTIES.

Seleccionamos dicho apartado en el menú principal.

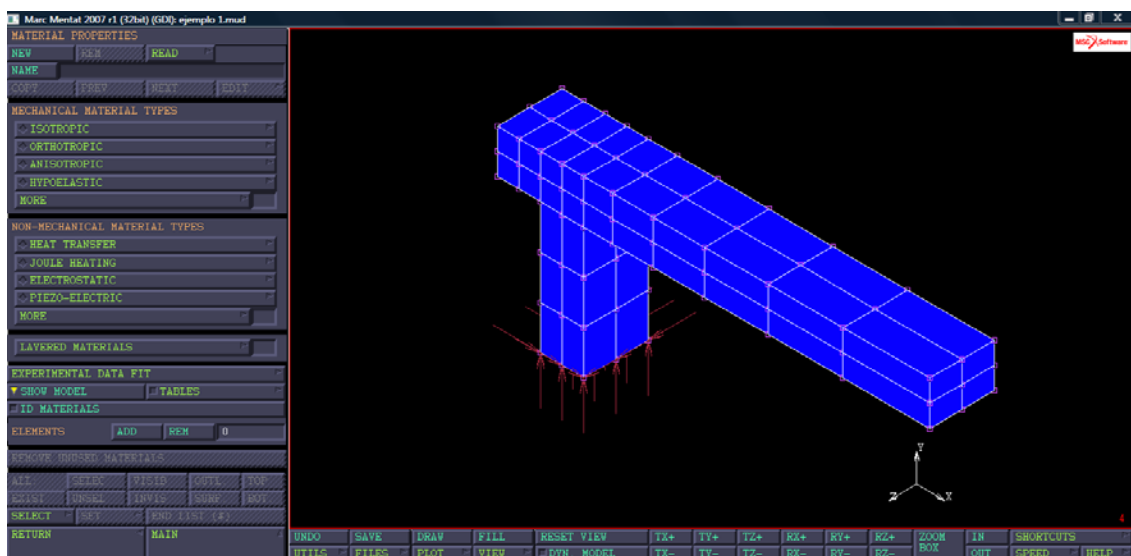


Figura 53. Imposición de las propiedades del material

MATERIAL PROPERTIES

Selección de tipo de material isótropo, y lo aplicamos a todos los elementos.

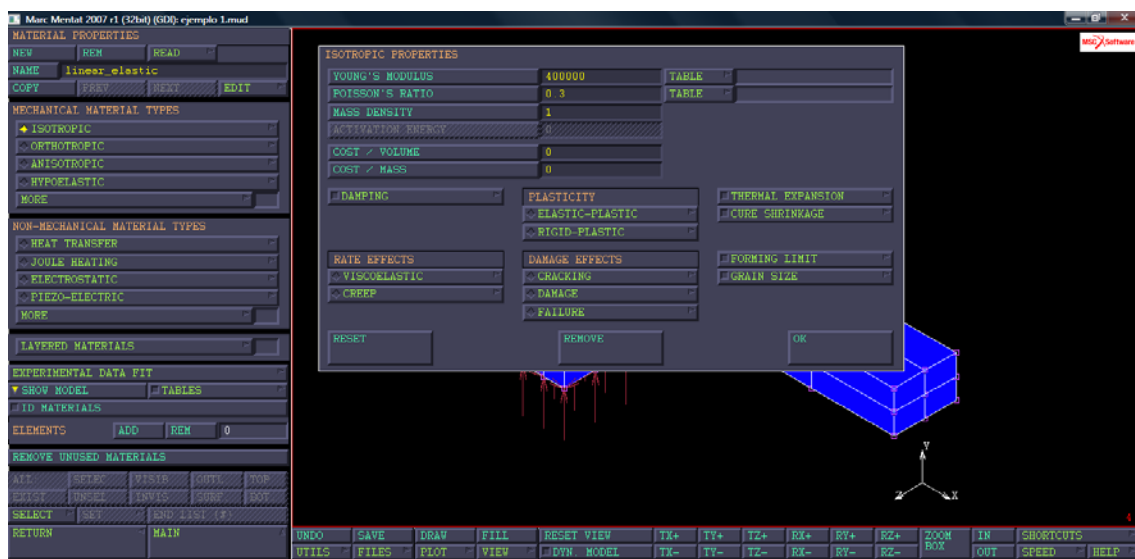


Figura 54. Imposición propiedades material. Introducción de propiedades isótropas

NEW

NAME

linear_elastic

ISOTROPIC

E=400000

NU=0.3

OK

ELEMENTS: ADD

ALL: EXISTING

SAVE

MAIN

Paso 4: Propiedades geométricas, GEOMETRIC PROPERTIES.

Ir al menú principal

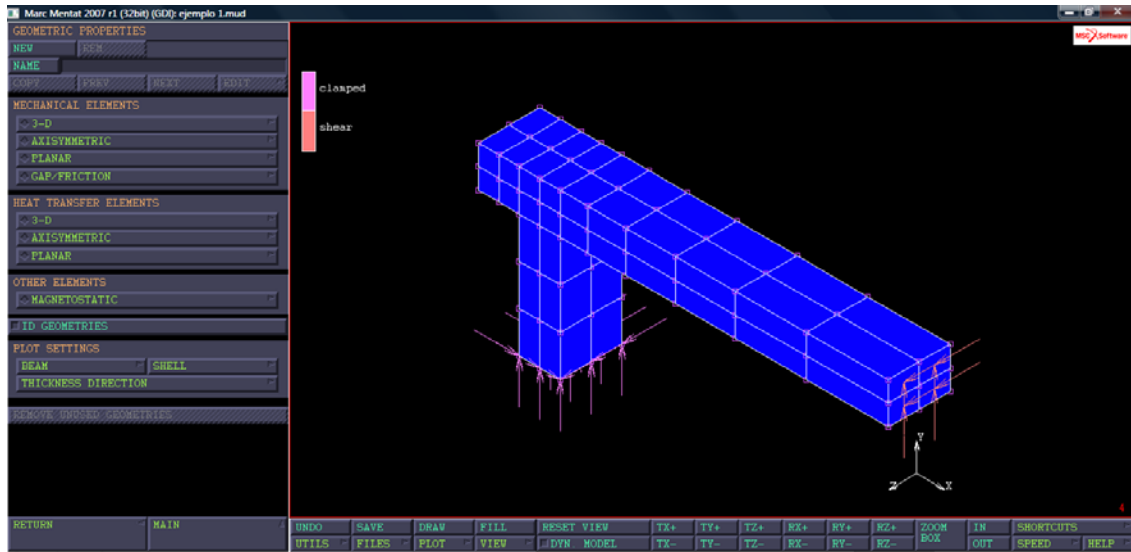


Figura 55. Imposición propiedades geométricas

GEOMETRIC PROPERTIES

Seleccionamos la formulación de “deformación asumida” para todos los elementos para mejorar su comportamiento a pandeo.

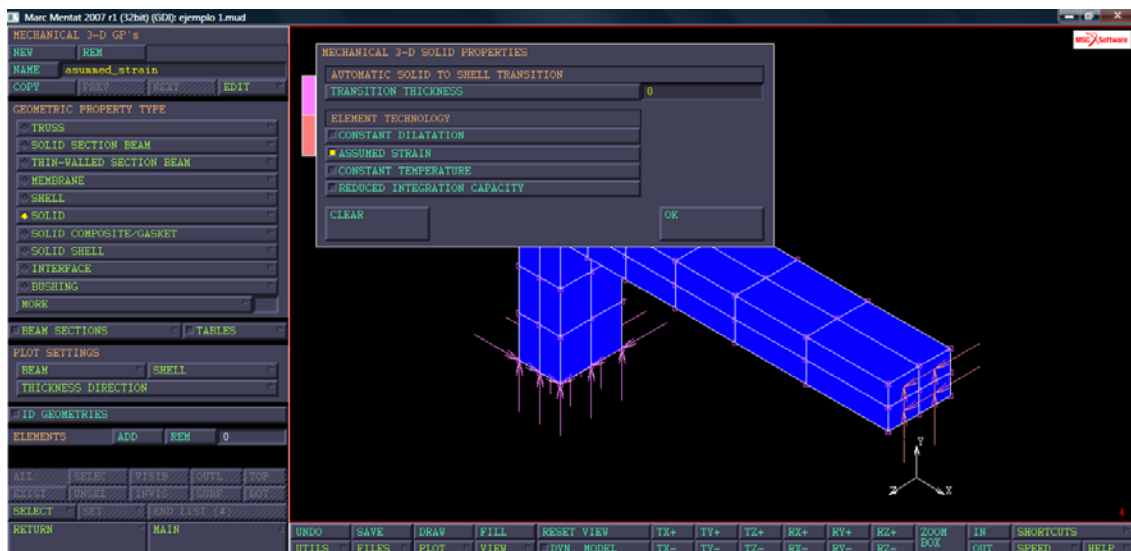


Figura 56. Propiedades geométricas, sólido 3D

NEW

NAME

assumed_strain

3-D



SOLID

ASSUMED STRAIN (on)

OK

ELEMENTS

ADD

ALL: EXISTING

SAVE

MAIN

Paso 5: Lanzar el caso, JOBS.

Ir al menú principal

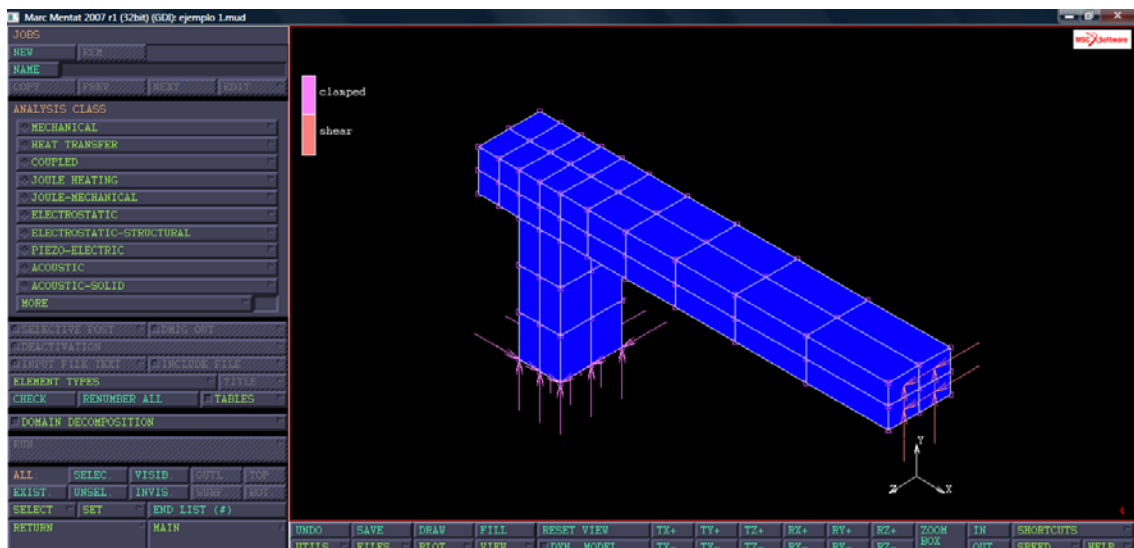


Figura 57. Menú principal del comando JOBS

JOBS

Definir el tipo de análisis como mecánico. Para un análisis lineal no hay que aplicarle casos de carga (LOADCASES), y podemos usar las opciones por defecto.

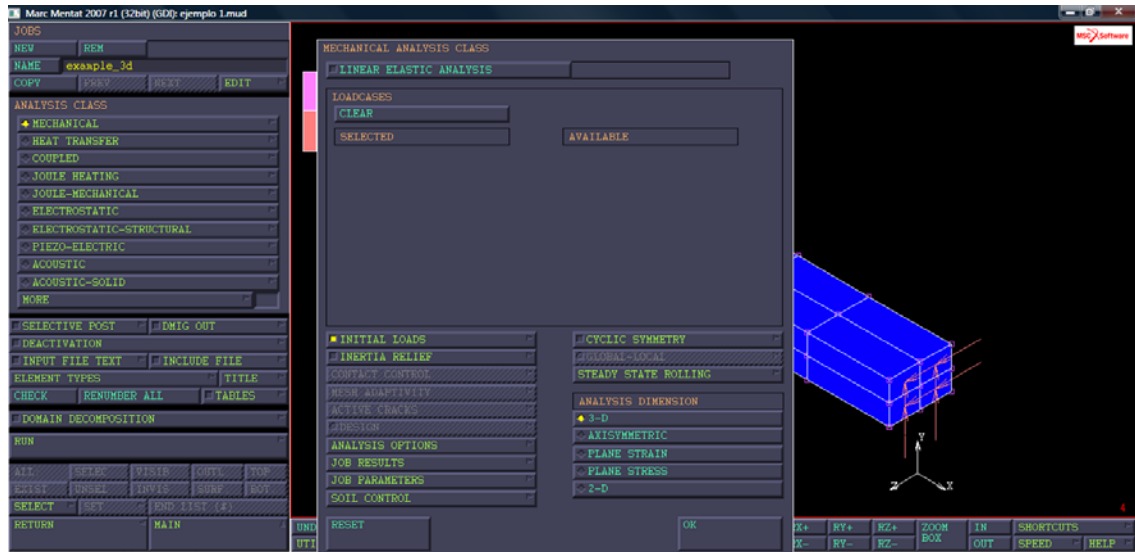


Figura 58. Menú JOBS, MECHANICAL

JOBS

NEW

NAME

example_3d

MECHANICAL

Seleccionamos las variables de salida que queremos que nos proporcione el software.

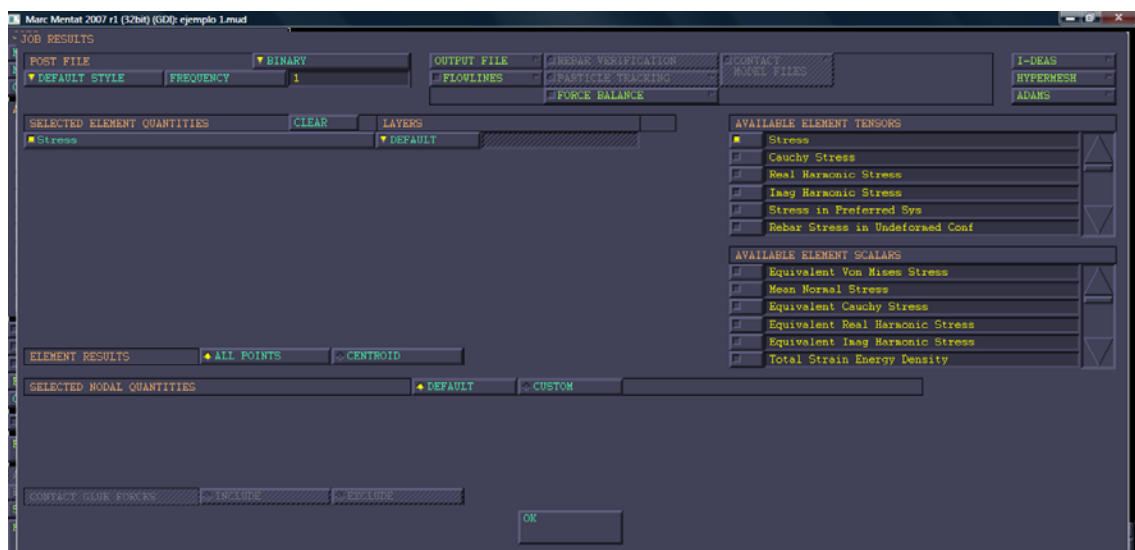


Figura 59. Selección de variable de salida del programa



JOB RESULTS

AVAILABLE ELEMENT TENSORS

STRESS

OK

Comprobamos que las condiciones de contorno estén como cargas iniciales.

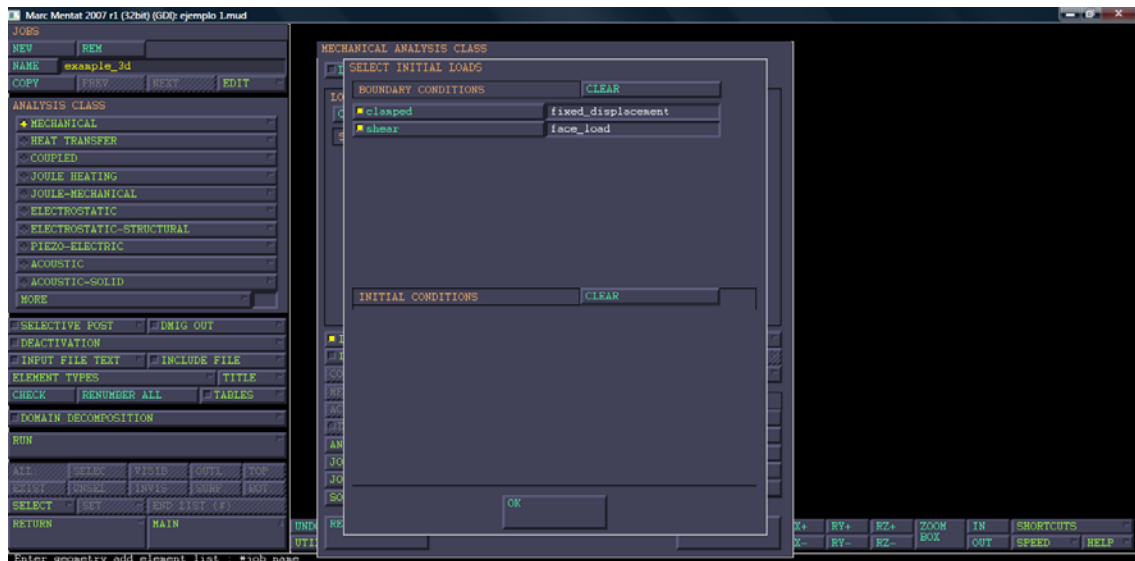


Figura 60. Condiciones de contorno activas y ordenadas

INITIAL LOADS

OK

OK

A continuación, seleccionamos sólido 3d, elemento tipo 7, y por último, guardamos el modelo.



6. SOFTWARE MARC MENTAT

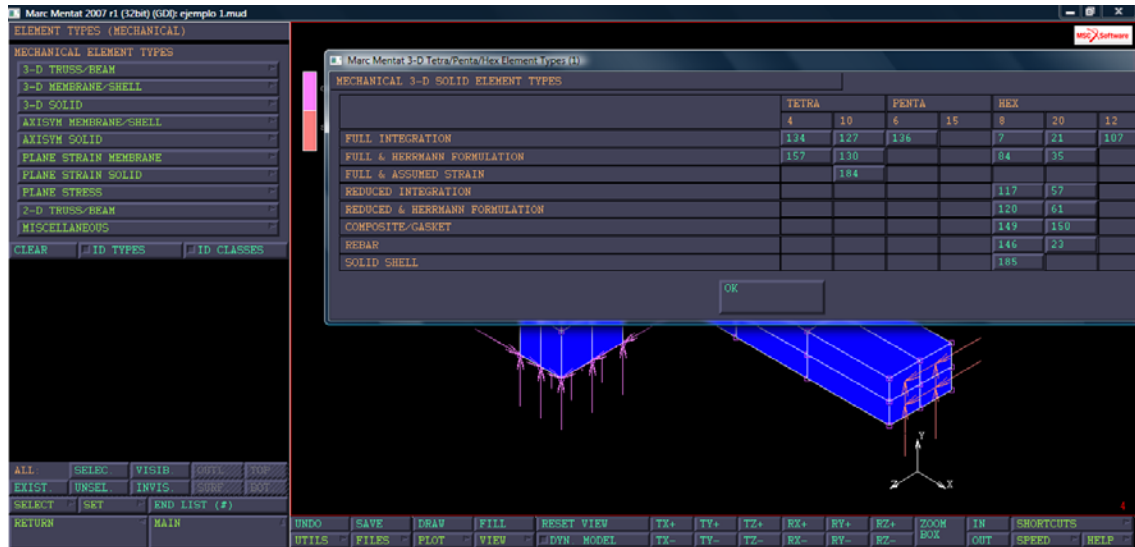


Figura 61. Tipo de elemento

ELEMENT TYPES

MECHANICAL

3-D SOLID

OK

ALL: EXISTING

SAVE

RETURN

RETURN

(seleccionar elemento tipo 7)

Una vez salvado el archivo, se lanza el caso “nombre del caso”.

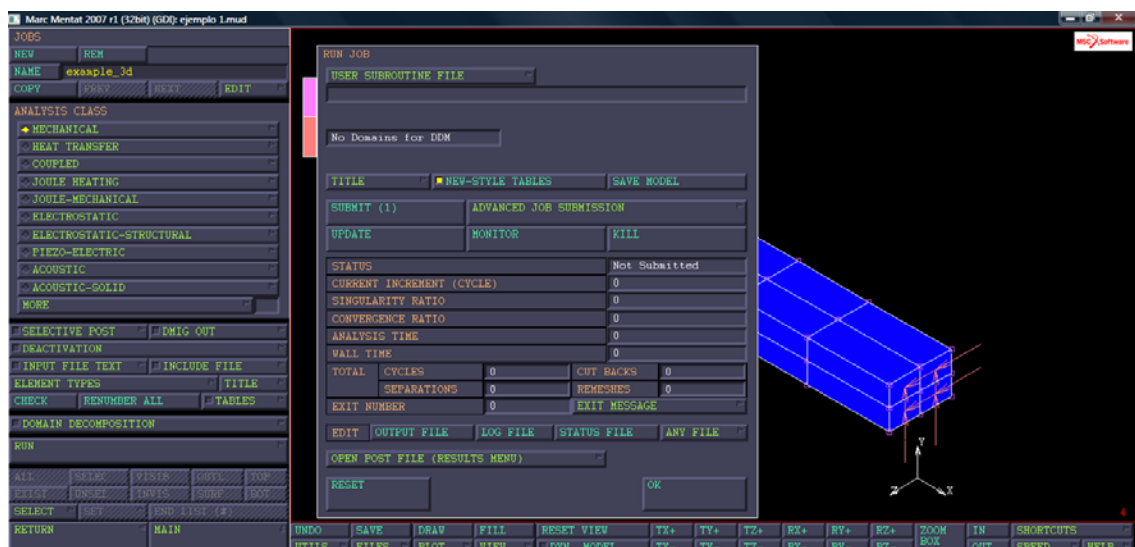


Figura 62. Menú Jobs, ventana de lanzamiento del caso

RUN

SUBMIT 1

Paso 6: Resultados, RESULTS.

Postprocesado: usar el comando (OPEN DEFAULT).

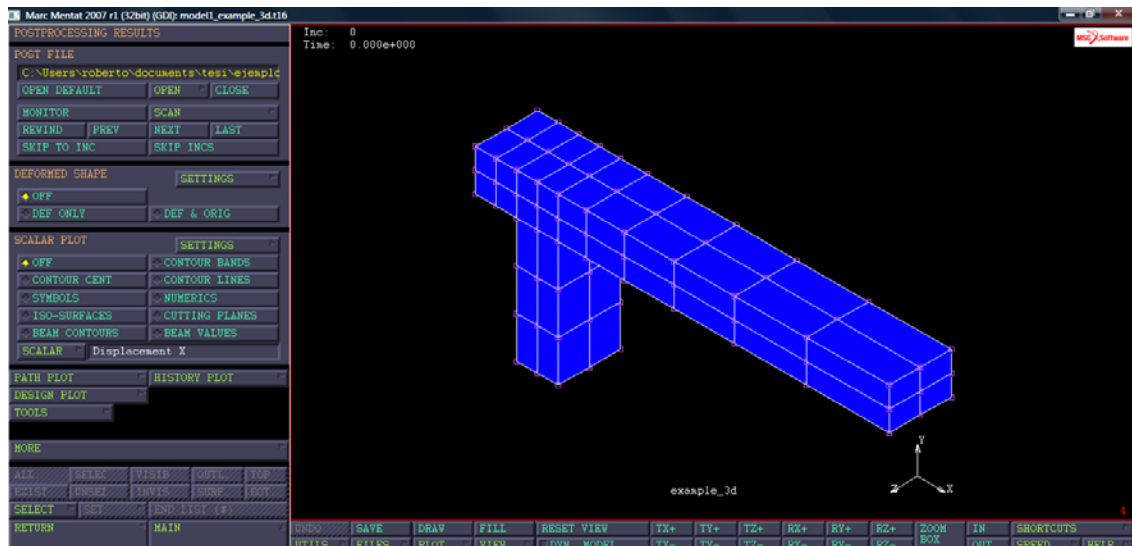


Figura 63. Apertura del archivo de resultados desde el menú de post procesado

RESULTS

OPEN DEFAULT

Ir al incremento 0 y seleccionar tensión equivalente de Von Mises para que ésta sea mostrada.

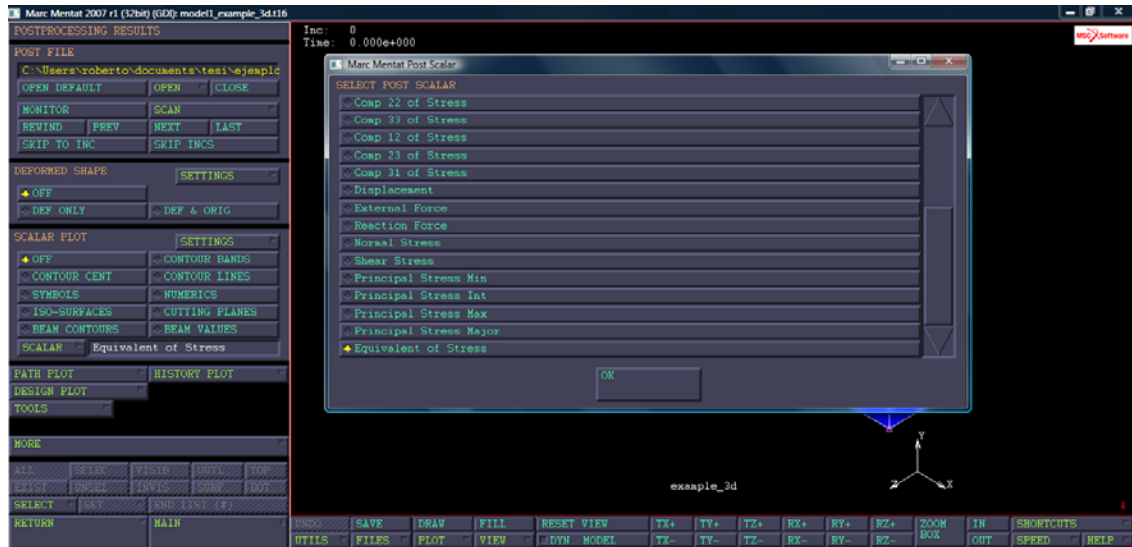


Figura 64. Selección de la variable de salida a mostrar

SCALAR

EQUIVALENT OF STRESS

OK

Diseñamos la deformada y la estructura sin deformar, para el incremento 0, usando “CONTOUR BANDS”, líneas de contorno.

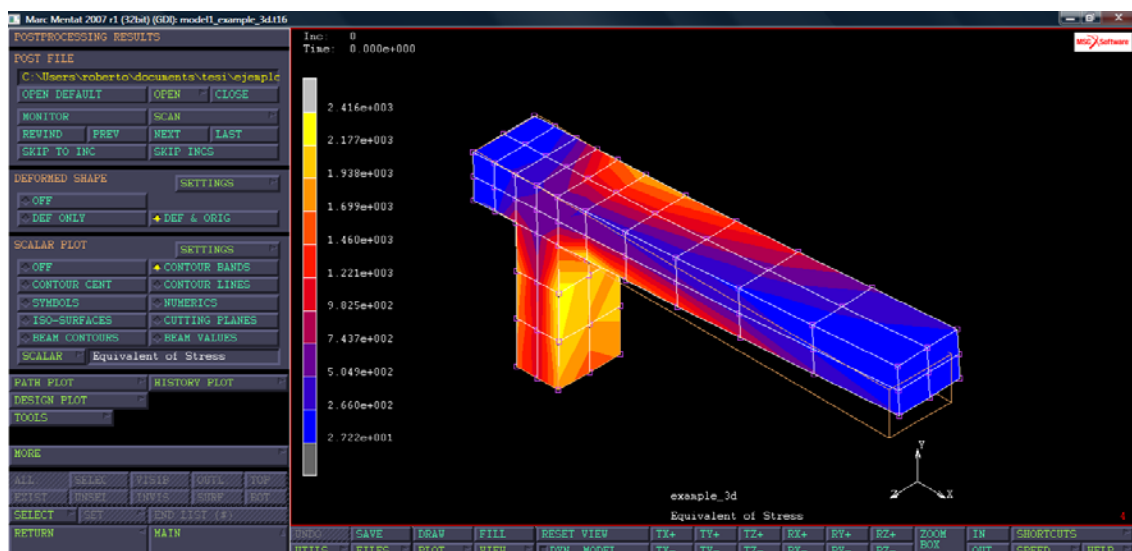


Figura 65. Tensión equivalente

DEFORMED AND ORIGINAL
CONTOUR BANDS

En los parámetros de la deformada es posible magnificar los desplazamientos

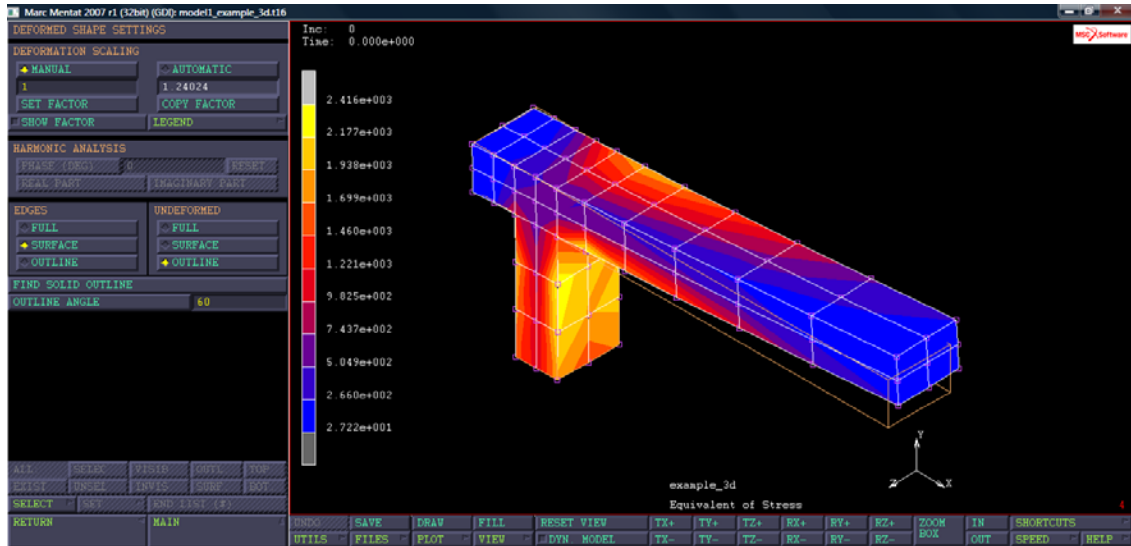


Figura 66. Parámetros de la estructura deformada 1

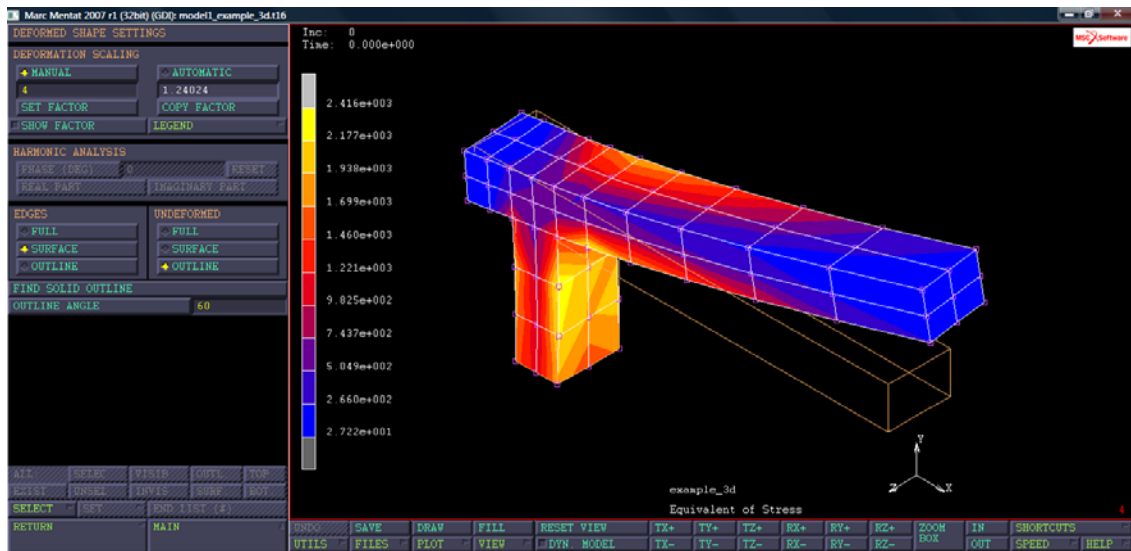


Figura 67. Parámetros de la estructura deformada 2

DEFORMED SHAPE
SETTINGS
MANUAL FACTOR
4
MANUAL FACTOR
1
RETURN

Definimos los estilos del plot para secciones transversales (cutting planes).

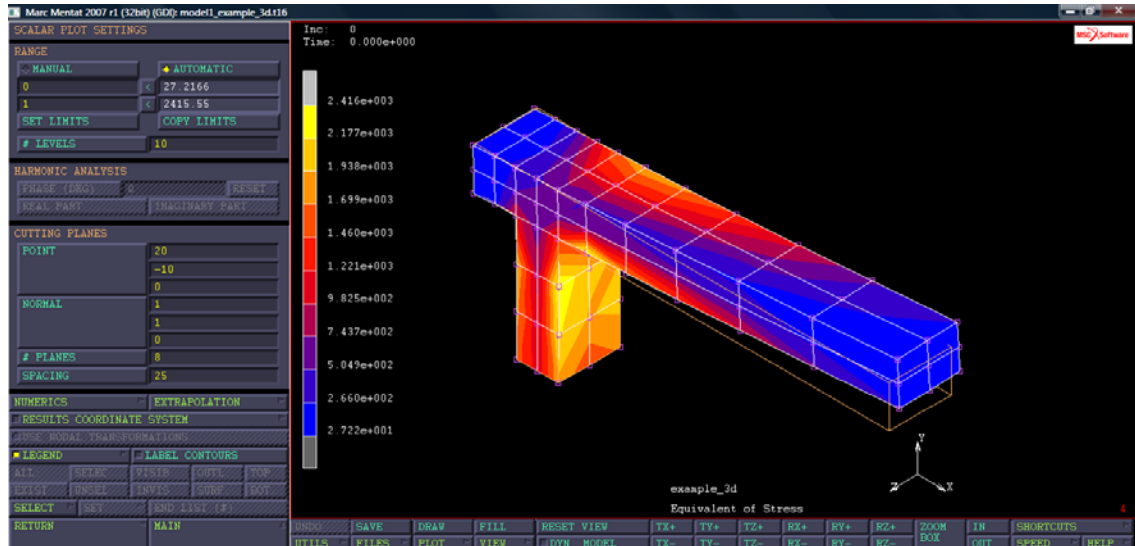


Figura 68. Configuración de gráficos

SCALAR PLOT

SETTINGS

POINT

20 -10 0

NORMAL

1 1 0

PLANES

8

SPACING

25

RETURN

Seleccionamos las secciones para visualizar la tensión equivalente de Von Mises.

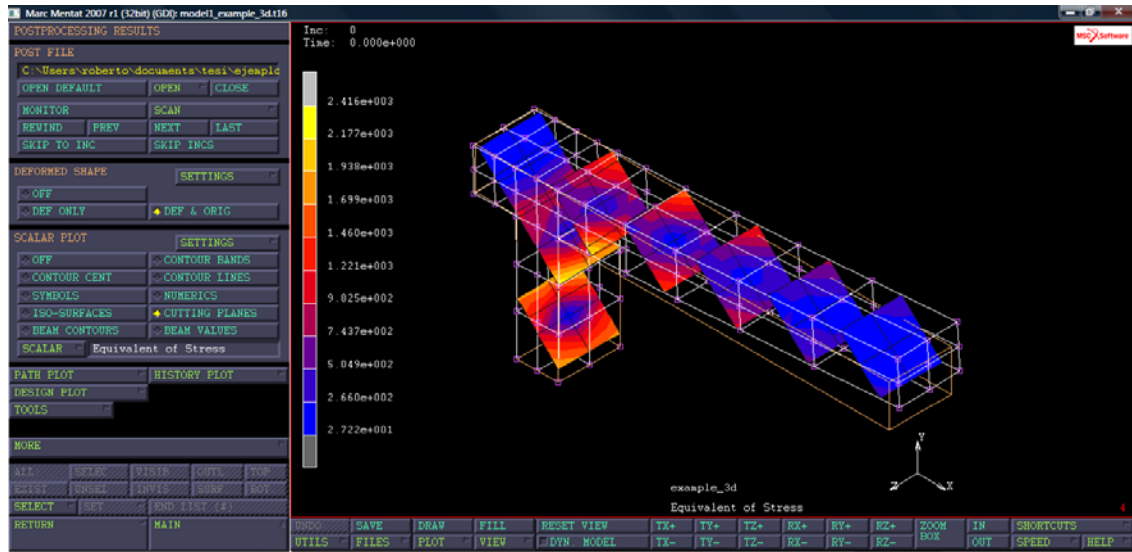


Figura 69. Archivo de resultados. Planos transversales

CUTTING PLANES

Volviendo a las bandas de contorno, definimos una secuencia de nodos.

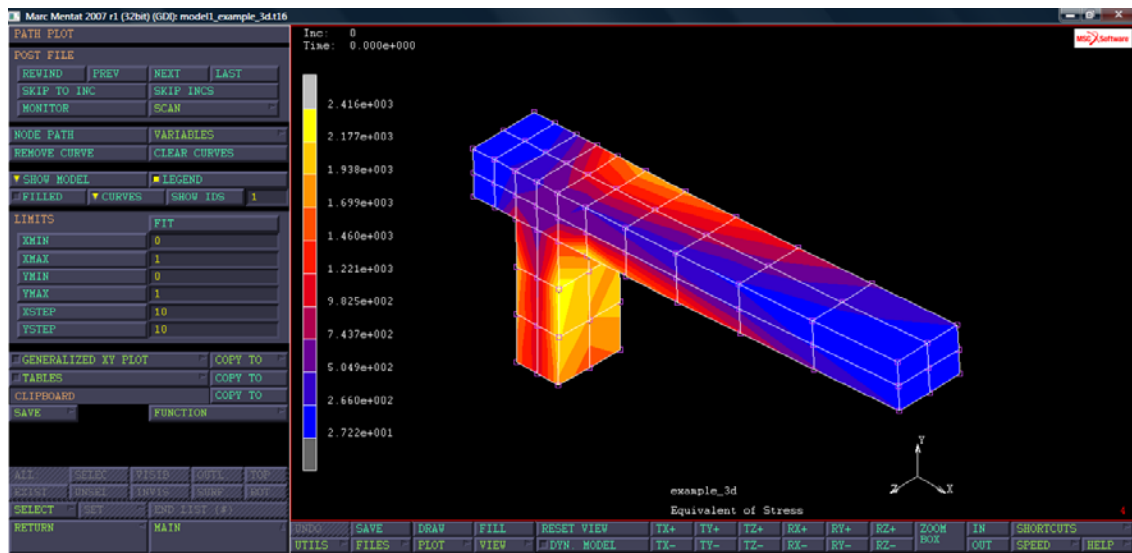


Figura 70. Graficar los resultados en un camino de nodos predeterminado

CONTOUR BANDS

PATH PLOT

NODE PATH

(pinchamos en los nodos para definir el camino - N1, N2, N3)

END LIST

El siguiente paso a realizar es añadir la curva para ese camino de nodos y ajustar la escala en los ejes.

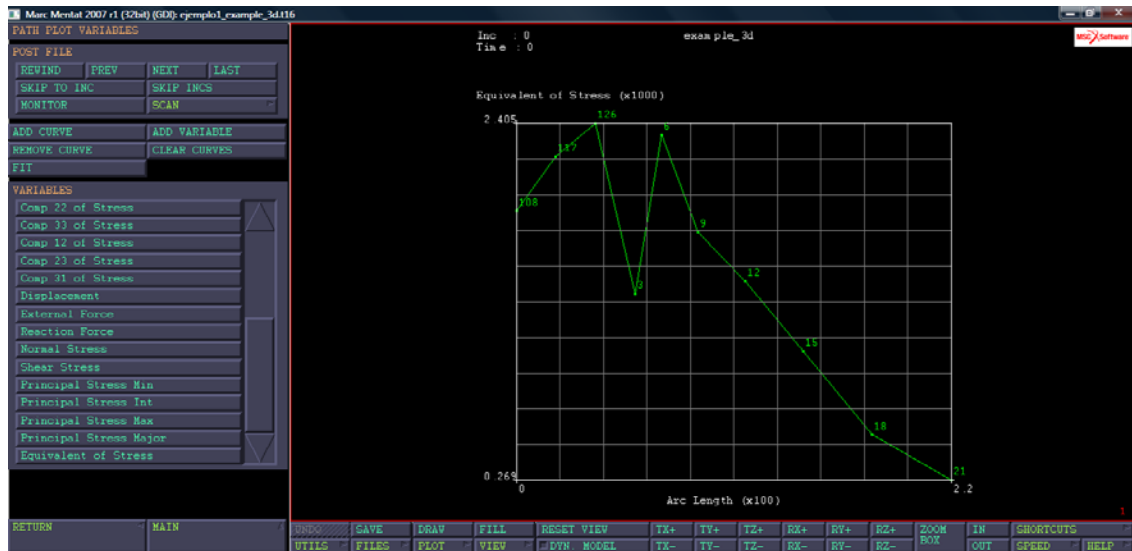


Figura 71. Representación de la tensión en el camino de nodos seleccionado

VARIABLES

ADD CURVE

ARC LENGTH

(variable X)

EQUIVALENT STRESS

(variable Y)

FIT

RETURN

RETURN

Dibujamos los vectores desplazamiento.

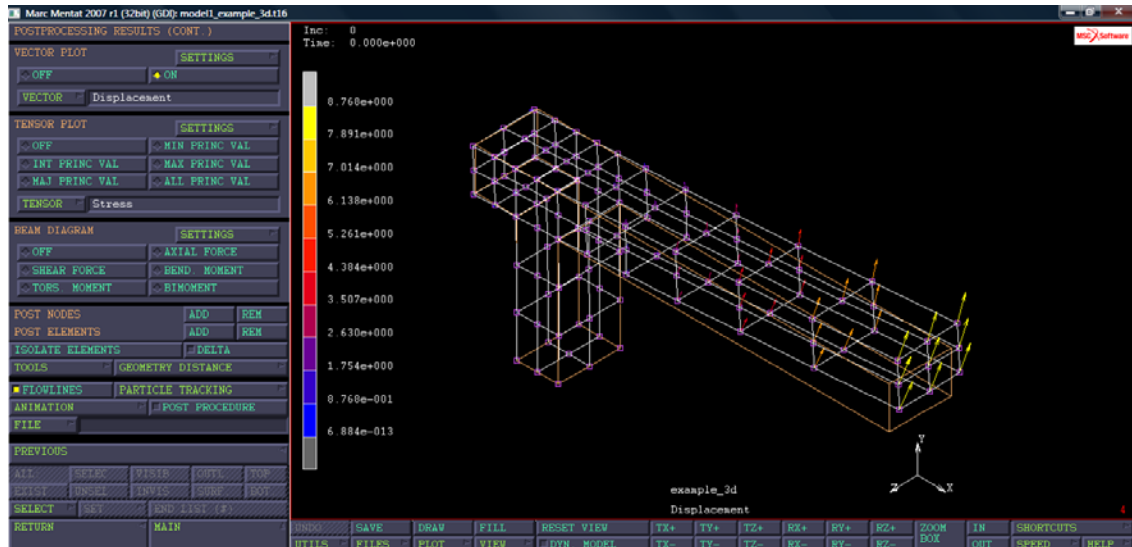


Figura 72. Postprocesado. Resultados con vectores de desplazamiento

MORE
VECTOR PLOT
ON

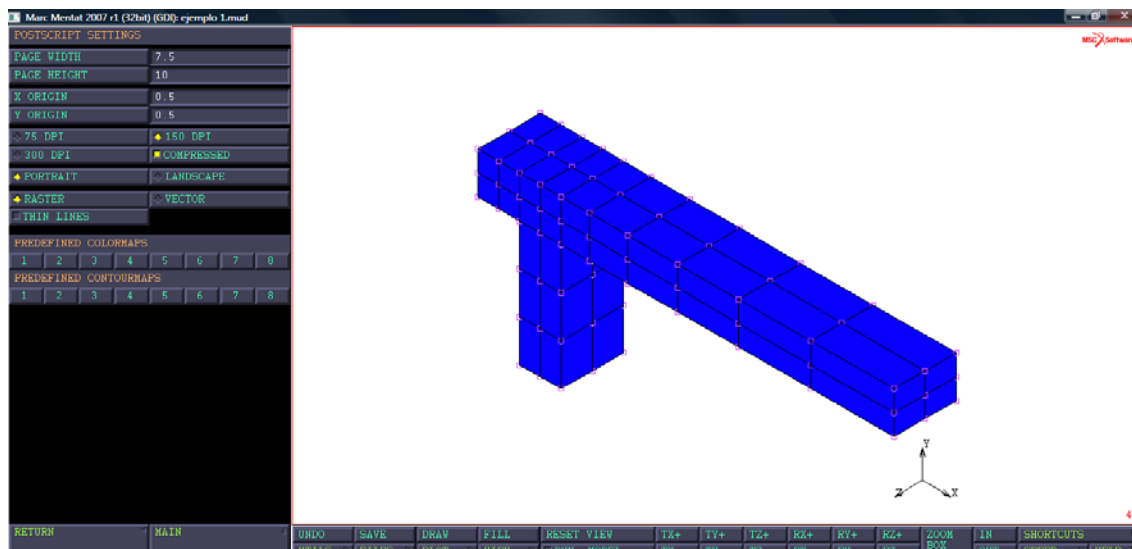


Figura 73. Parámetros de configuración en el postprocesado

UTILS
POSTSCRIPT
SETTINGS
PREDEFINED COLORMAPS 2/4



6.1.2 EJEMPLO 2: *Punzonado*

En el ejemplo descrito se analiza el proceso de punzonado. Una herramienta con un saliente rígido se presenta contra un plato circular. El objetivo de este proceso es producir un plato circular con una incisión esférica. Con el análisis estático descrito se persigue la determinación de las tensiones residuales y las deformaciones plásticas en la pieza después de la operación.

Descripción

El problema muestra la preparación de un análisis por contacto que implica múltiples cuerpos rígidos (la herramienta y el plato soporte) y un cuerpo deformable (la pieza). El extremo de la herramienta es una esfera unida a un plato rígido plano. La pieza está fijada de manera que los desplazamientos radiales están restringidos en el diámetro exterior, mientras que los desplazamientos axiales están restringidos en el nodo posicionado en la esquina del diámetro exterior en contacto con el plato de soporte. La parte baja de la herramienta es un plato plano con un agujero en la misma posición que el hoyuelo de la parte superior de la herramienta. El plato de soporte sostiene toda la pieza, a excepción de la región del agujero.

Idealización

Debido a la naturaleza axialsimétrica de la geometría y las cargas, este proceso puede ser idealizado como un modelo axialsimétrico. El borde de la pieza está anclado, lo cual previene el movimiento como cuerpo rígido de la pieza. El plato que soporta la pieza será modelado como un cuerpo rígido, y permanecerá en su lugar durante el análisis. El punzón se modelará como un cuerpo rígido, y se moverá durante el análisis hacia el plato estático mientras que incidirá sobre la pieza.

La herramienta se detendrá cuando las superficies planas de la herramienta estén en contacto completo con la pieza. Esto ocurre cuando el desplazamiento total del punzón es 0.1488 pulgadas, lo que alcanza en 0.4 segundos. Así, la velocidad de la parte superior de la herramienta es 0.372 pulgadas por segundo. La fricción entre la herramienta y la pieza la consideramos despreciable, y por lo tanto no será tomada en consideración en este análisis.

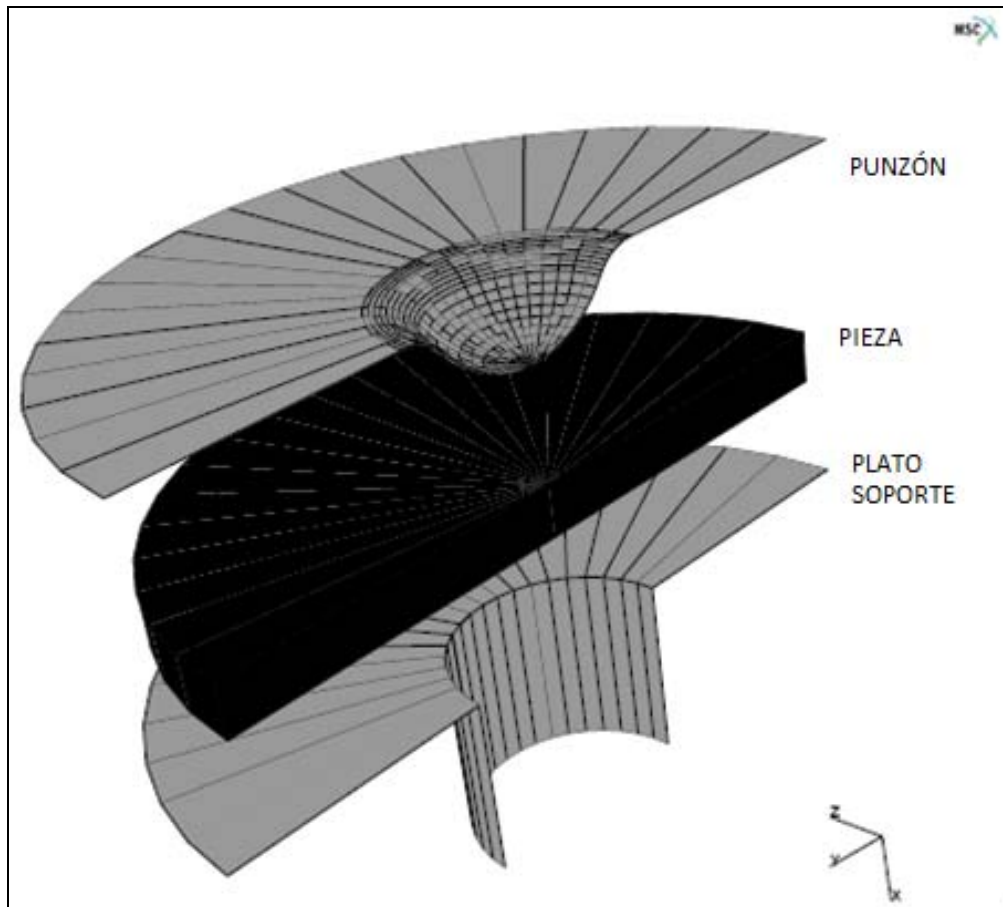


Figura 74. Elementos del problema

Requerimientos para un análisis de éxito

Se considerará que el análisis ha tenido éxito cuando el punzón está al ras con la pieza y se quita posteriormente, para determinar las tensiones residuales.

Datos del problema

La pieza está construida de acero, con un módulo de Young de 30×10^6 psi y un coeficiente de Poisson de 0,3. Tiene un límite de elasticidad de 39000 psi. El material presenta endurecimiento por deformación. La pieza tiene un radio de 0,7874 pulgadas y un espesor de 0,117 pulgadas.

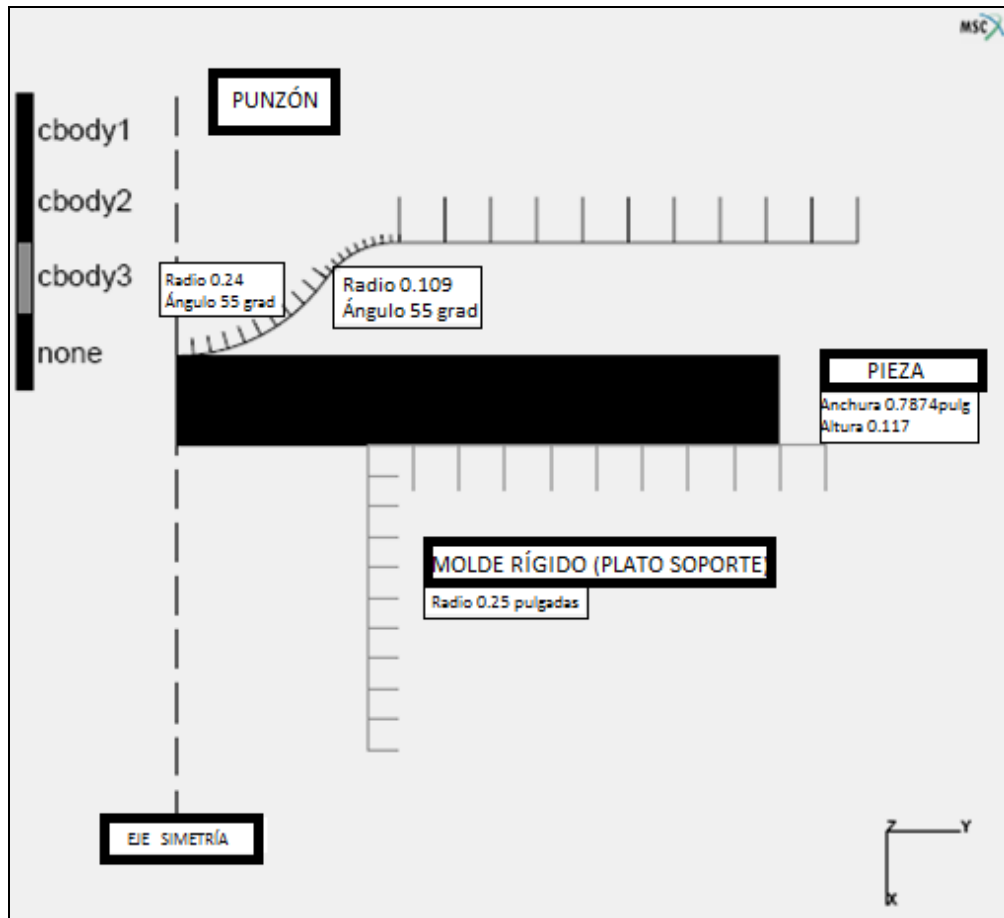


Figura 75. Dimensiones del Punzón, pieza, y plato de soporte

El punzón es una esfera de radio 0,24 con un radio de acuerdo de 0,109 que lo hace tangente a una pieza horizontal. Se moverá una distancia total de 0,1488 pulgadas durante un periodo de 0,4 segundos. El plato de soporte tiene un agujero cilíndrico de radio 0,25 pulgadas en el que la pieza es forzada. Tanto el punzón como el plato de soporte se consideran rígidos durante el análisis.

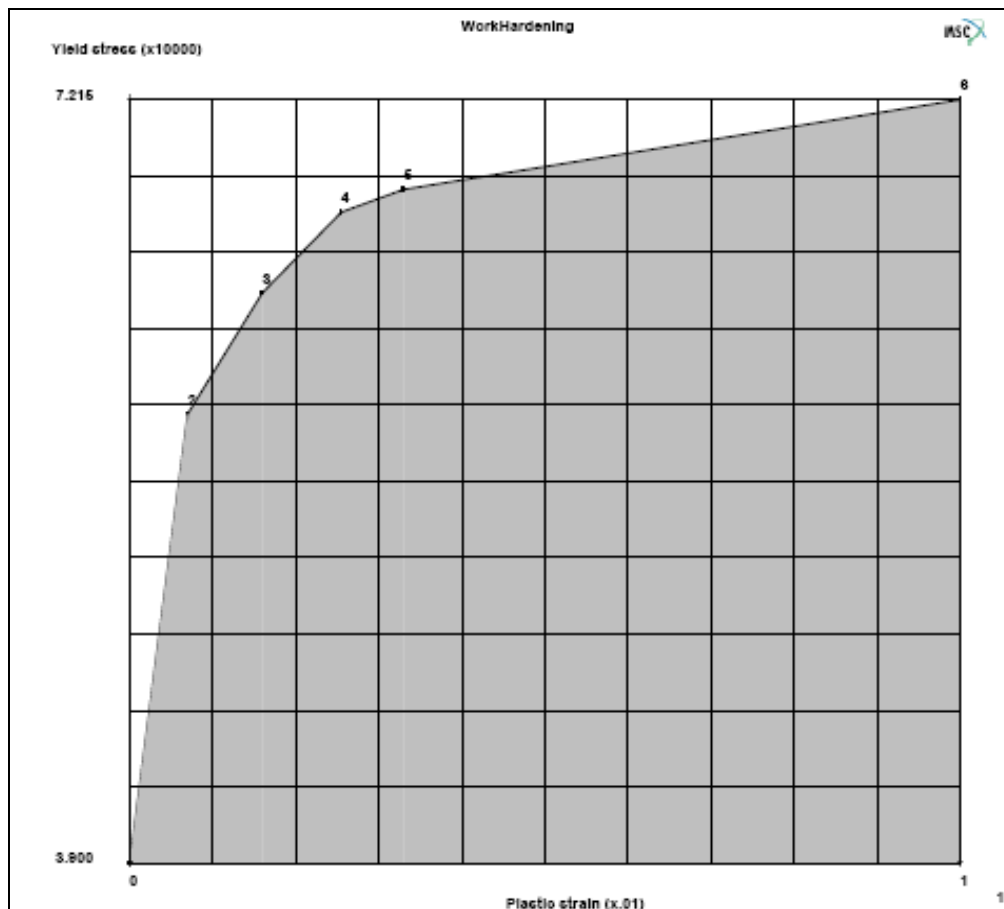


Figura 76. La curva de endurecimiento del material

Pasos a seguir

Paso 1: Crear un modelo rectangular y convertirlo en elementos finitos.

Paso 2: Crear las curvas necesarias para el punzón y plato de soporte.

Paso 3: Aplicar las restricciones de desplazamientos y la información sobre el material.

Paso 4: Identificar los cuerpos en contacto y crear la tabla que define el movimiento del punzón.

Paso 5: Definir los pasos incrementales y los parámetros de convergencia.

Paso 6: Activar los parámetros de grandes deformaciones y lanzar el caso.

Paso 7: Post procesado de los resultados mostrando la estructura deformada y las tensiones y deformaciones residuales.



Paso 1: Crear un modelo rectangular y convertirlo en elementos finitos.

El primer paso es crear la pieza. El método seguido es la creación de un punto y sucesivamente su expansión en una línea curva, seguida de la expansión de esta curva en una superficie quad (4 nodos). Se usa la siguiente secuencia de comandos para crear el primer punto:

MAIN

MESH GENERATION

pts ADD

0.24 0 0

Después, para expandir el punto usamos una traslación de 0.117 pulgadas en la dirección x, y entonces expandimos la curva resultante usando una traslación de 0.7874 en la dirección y. Para crear la superficie quad ha sido usada la siguiente secuencia de comandos:

MAIN

MESH GENERATION

EXPAND

TRANSLATIONS

0.117 0 0

POINTS

all: EXIST.

TRANSLATIONS

0 0.7874 0

CURVES

all: EXIST.

FILL

El siguiente paso es convertir las entidades geométricas en elementos finitos. Esto se hace usando el comando CONVERT. A lo largo del espesor se usan 5 divisiones, y a lo largo del radio 20. Para mallar la superficie, los pasos a seguir se indican a continuación:



MAIN

MESH GENERATION

CONVERT

DIVISIONS

5 20

SURFACES TO ELEMENTS

all: EXIST.

PLOT

draw SURFACES

(on)

REGEN

RETURN

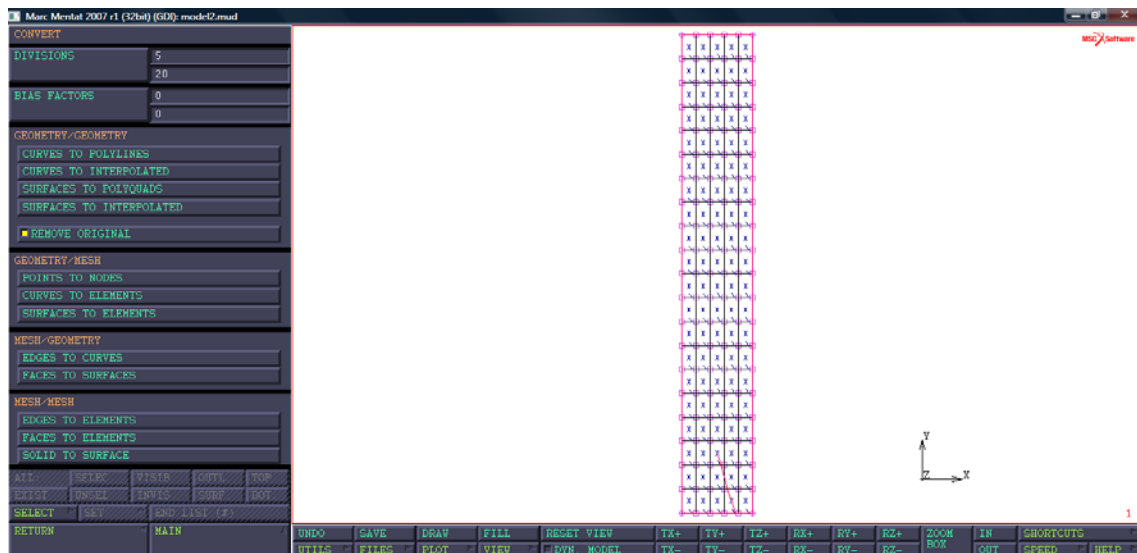


Figura 77. Resultado tras aplicar el comando CONVERT

Una parte importante del análisis requiere que una esquina afilada se desarrolle en el borde del cilindro.

Para lograr esto, el mallado ha sido redefinido en esa área. Será necesario hacer zoom en esa área. Los nodos cerca del radio de 0.25 se moverán exactamente a esa posición. La coordenada y de esos nodos se puede determinar con el comando SHOW (mostrar), en el panel de los nodos. La operación de mover se hace usando las siguientes instrucciones:



MAIN

MESH GENERATION

coordinate system SET

V DOMAIN

0 .25

V SPACING

.25

GRID

(on)

RETURN

MOVE

FORMULAS

x

0.25

z

NODES

(Seleccionar la octava fila de nodos)

37 38 39 40 41 42

END LIST (#)

RETURN

El siguiente paso es subdividir la sexta fila de elementos. Para ello se ha usado la siguiente secuencia de botones:

MAIN

MESH GENERATION

SUBDIVIDE

DIVISIONS

1 2 1

ELEMENTS (Seleccionar la octava fila de nodos)

26 27 28 29 30

END LIST (#)

Después de subdividir, normalmente es necesario quitar todos los nodos duplicados. También es bueno volver a numerar los elementos, ya que hay un salto en la numeración a raíz de la operación de subdivisión. Esto se puede hacer de la siguiente manera:



MAIN

MESH GENERATION

SWEEP

sweep NODES

all: EXIST.

RETURN

RENUMBER

ALL

Paso 2: Crear las curvas necesarias para el punzón y plato de soporte.

El paso sucesivo es crear los moldes. Estos se representarán mediante entidades geométricas. Estas entidades son una combinación de curvas. Para el punzón, el primer paso es situar un punto en el centro de la esfera. A continuación, se usa este punto para crear un arco. Es más fácil tener un cuerpo rígido casi tocando el cuerpo deformable. Por ello, el punto central se creará duplicando el punto central superior de la pieza a una distancia igual al radio de la esfera. Con la siguiente secuencia de comandos a continuación se creará el punto central y el arco:

MAIN

MESH GENERATION

DUPLICATE

TRANSLATIONS

-0.24 0 0

POINTS

1

(Pinchar el punto inferior izquierdo)

END LIST (#)

RETURN

CURVE TYPE

CENTER/RADIUS/ANGLE/ANGLE

RETURN

crvs ADD

0 0 0

(Seleccionar el punto que se acaba de crear (Centro))

0.24

(Radio)

0 55

(Ángulo de inicio, ángulo final)



La curva siguiente debe ser tangente a la que se acaba de crear. Por lo tanto, se cambia el tipo de curva a arco, del tipo tangent/radius/angle (tangente/radio/ángulo), antes de crear la curva siguiente. El radio del arco es de 0.109 pulgadas y el ángulo será negativo, de 55 grados. El signo negativo indica que el arco va en el sentido de las agujas del reloj. La secuencia siguiente sirve para crear el arco:

MAIN

MESH GENERATION

CURVE TYPE

TANGENT/RADIUS/ANGLE

RETURN

crvs ADD

11 (Seleccionar el punto final del arco creado anteriormente
(punto tangente))

0.109 (Radio)

-55 (Ángulo)

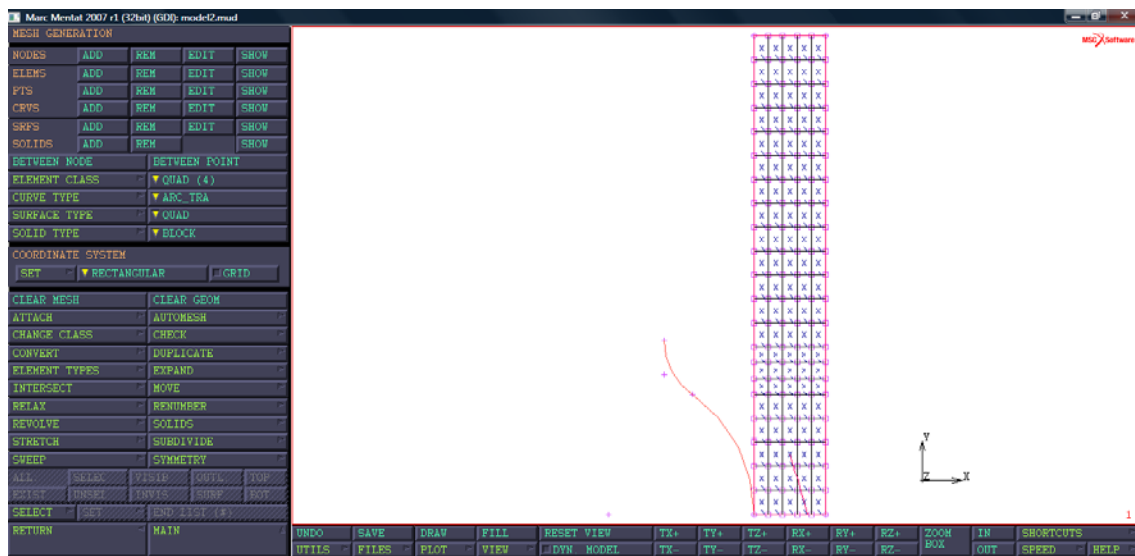


Figura 78. Parte esférica del punzón

El paso siguiente es terminar el cuerpo rígido. Hace falta una línea para terminar el punzón, una línea horizontal tangente al segundo arco. Se creará con la siguiente secuencia de instrucciones:



MAIN

MESH GENERATION

EXPAND

TRANSLATIONS

0 0.6 0

POINTS

14

(Seleccionar el punto final del ultimo arco)

END LIST (#)

FILL



Figura 79. Geometría del punzón

El siguiente paso es crear el plato de soporte. Primero se añadirá un punto en la parte inferior de la pieza en una posición y de 0.25. Entonces, ha sido expandido en las direcciones "x" e "y", creando la dos líneas requeridas para el cuerpo rígido. Para generar estas curvas empleamos la secuencia de comandos siguiente:

MAIN

MESH GENERATION

pts ADD

0.357 0.25 0

EXPAND

POINTS

16

(Seleccionamos el punto que acabamos de crear)

```

END LIST (#)
TRANSLATIONS
0.4 0 0
POINTS
16
END LIST (#)
FILL
  
```

(Seleccionar el punto en la esquina)

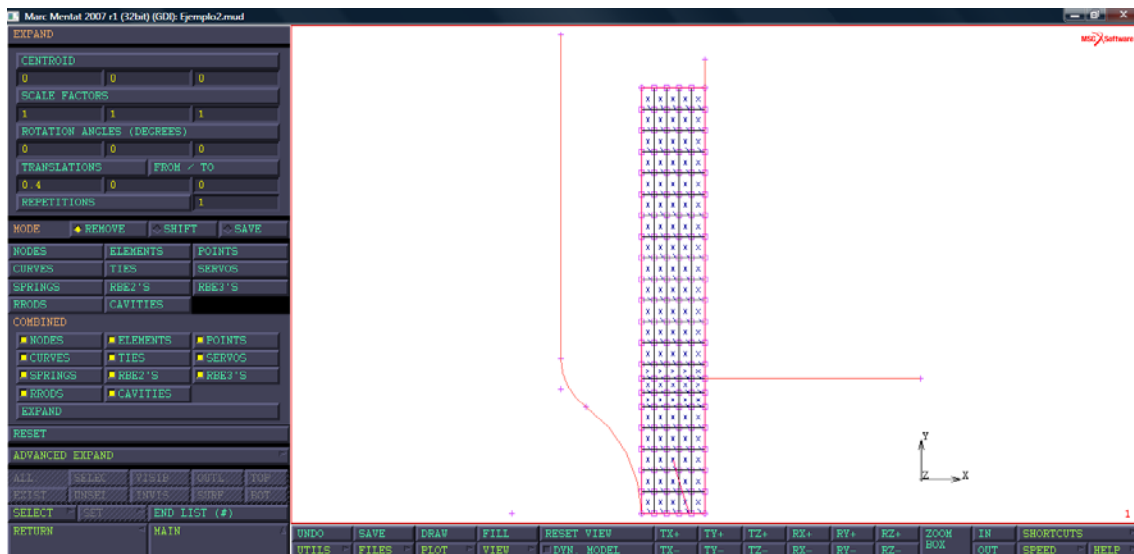


Figura 80. Punzón, pieza y plato soporte

Paso 3: Aplicar las restricciones de desplazamientos y la información sobre el material.

Primero se crea una tabla con las tensiones frente a las deformaciones plásticas. Se siguen para ello los siguientes pasos:

MAIN

MATERIAL PROPERTIES

TABLES

NEW

1 INDEPENDENT VARIABLE

TYPE

eq_plastic_strain

OK (Seleccionar OK solo si type eq_plastic_strain está seleccionado)



ADD

0 39000

0.7e-3 58500

1.6e-3 63765

2.55e-3 67265

3.3e-3 68250

10e-3 72150

FIT

NAME

work-hard

MORE

independent variable v1: LABEL

plastic strain

function value f: LABEL

yield stress

RETURN

FILLED

SHOW TABLE

SHOW MODEL (seleccionar SHOW MODEL para volver a la vista
del modelo)

El siguiente paso es introducir las propiedades del material y asignárselas a los elementos. La tabla debe asignarse al valor del límite elástico, para incluir el endurecimiento. Las instrucciones siguientes nos permitirán asignar dichas propiedades al material:

MAIN

MATERIAL PROPERTIES

ISOTROPIC

YOUNG'S MODULUS

30.0e6

POISSON'S RATIO

0.3

PLASTICITY

ELASTIC-PLASTIC

INITIAL YIELD STRESS

1

initial yield stress TABLE

work-hard

OK (dos veces)

elements ADD

all: EXIST.

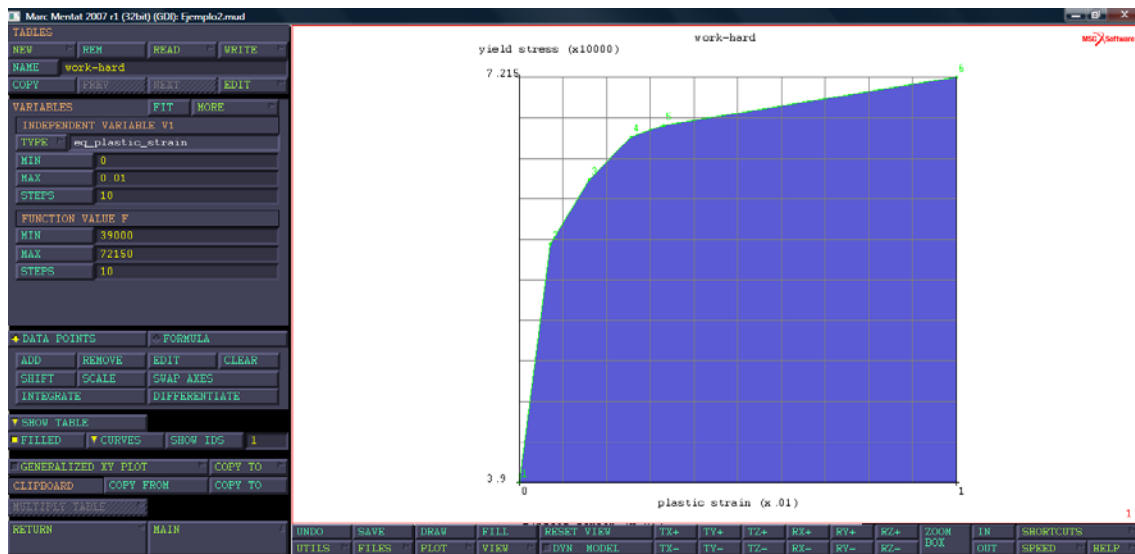


Figura 81. Curva de endurecimiento (Curva tensión-deformación)

El paso sucesivo es empotrar el final de la pieza. El modelo es axialsimétrico y por lo tanto, tiene solo dos grados de libertad en cada nodo. La primera condición de contorno fijará el nodo en la parte superior derecha tanto axial como radialmente. El segundo tipo de condiciones de contorno restringirá el movimiento radial de ambos nodos en el eje de simetría y de los nodos en el radio exterior de la pieza.

MAIN

BOUNDARY CONDITIONS

MECHANICAL

FIXED DISPLACEMENT

DISPLACEMENT X (on)

DISPLACEMENT Y (on)

OK

nodes ADD



126 (Pinchar el nodo en la parte superior derecha)

END LIST (#)

NEW

FIXED DISPLACEMENT

DISPLACEMENT Y (on)

OK

nodes ADD

(Seleccionamos los nodos de la parte inferior)

(Seleccionamos los nodos de la parte superior)

END LIST (#)

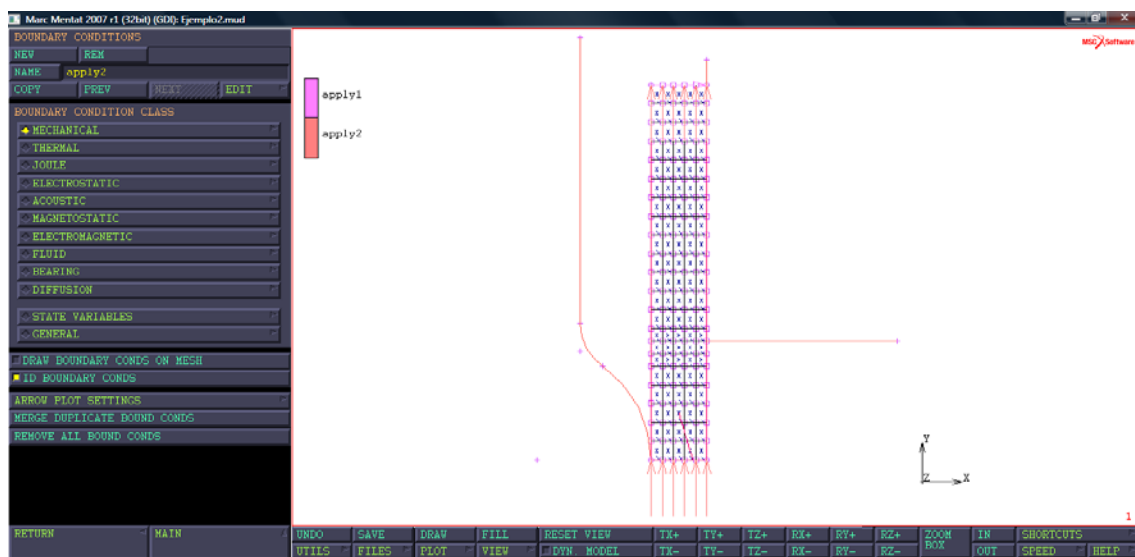


Figura 82. Condiciones de contorno

Paso 4: Identificar los cuerpos en contacto y crear la tabla que define el movimiento del punzón.

En este paso asignamos los elementos y curvas con las condiciones de contacto. Los cuerpos rígidos deben siempre seguir a los cuerpos deformables. La secuencia de botones siguiente asignará todos los elementos al cuerpo deformable 1.

MAIN

CONTACT

CONTACT BODIES

DEFORMABLE



NAME

workpiece

elements ADD

all: EXIST.

El próximo paso es asignar las curvas a los cuerpos rígidos. Por defecto, se usarán curvas analíticas para los cuerpos rígidos. Por lo tanto, no es necesario modificar nada manualmente para especificar el número de subdivisiones usadas para discretizar las curvas.

Para crear los 2 cuerpos rígidos se emplea la secuencia de botones a continuación mostrada:

MAIN

CONTACT

CONTACT BODIES

NEW

NAME

punch

crvs ADD

1 2 3

(Seleccionar las curvas del punzón)

END LIST (#)

NEW

NAME

back

crvs ADD

5 4

(Seleccionar las curvas del plato soporte)

END LIST (#)

Llegados a este punto, es recomendable comprobar que la definición la dirección de las curvas usadas en los cuerpos rígidos.

MAIN

CONTACT

CONTACT BODIES

PLOT

elements SOLID

REGEN

RETURN

ID CONTACT

(on)

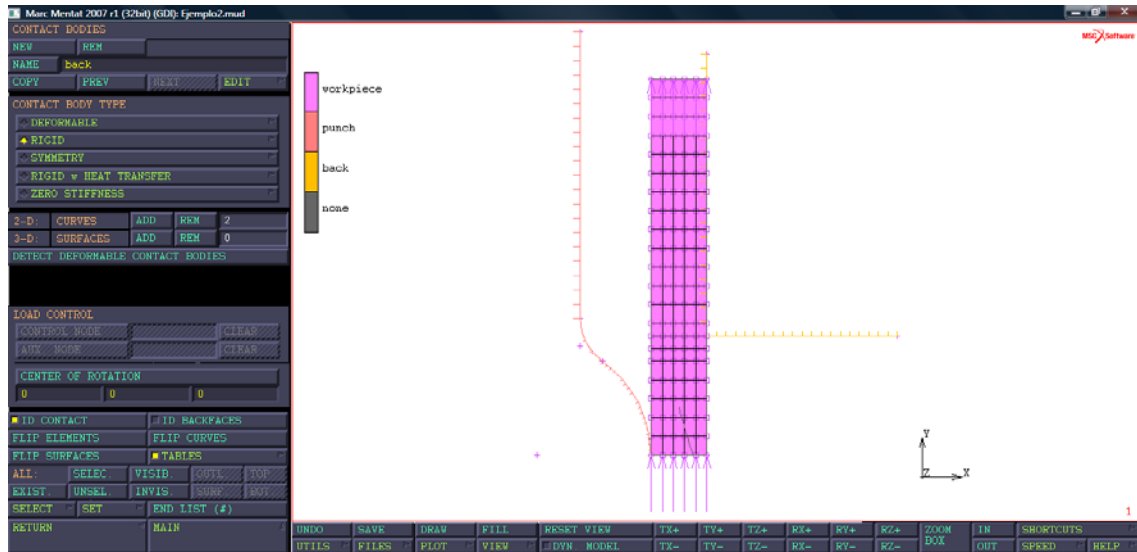


Figura 83. Definición incorrecta de la dirección de las curvas en el plato soporte

El botón ID CONTACT mostrará los cuerpos rígidos y su dirección. Si cualquiera de las curvas está definida tal que el cuerpo rígido está en el mismo lado que el cuerpo deformable, se puede cambiar usando el comando FLIP CURVES.

MAIN

CONTACT

CONTACT BODIES

FLIP CURVES

4

(Seleccionar curva)

END LIST (#)

ID CONTACT

(off)

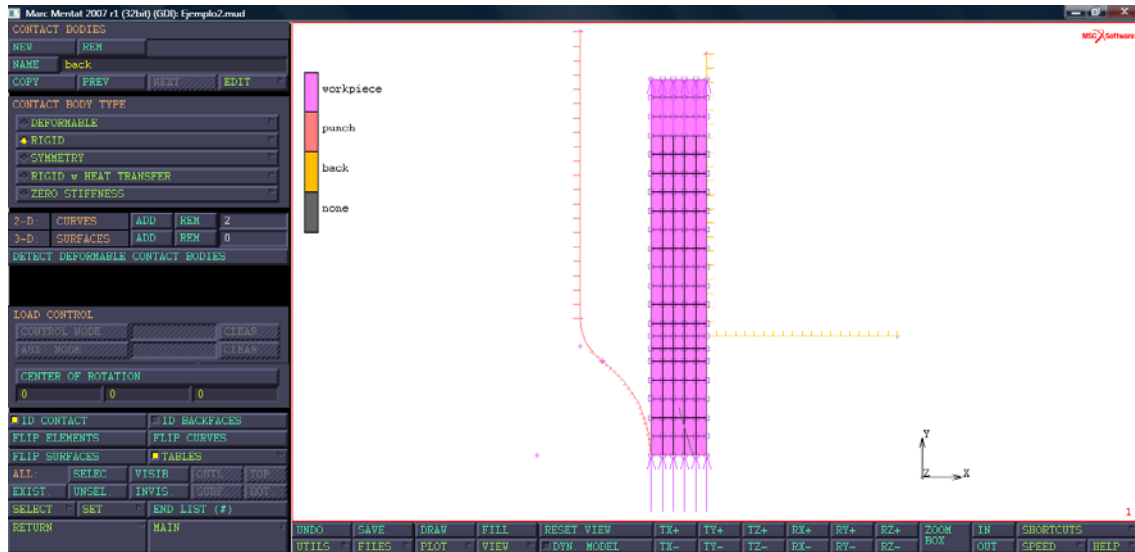


Figura 84. Definición correcta de las curvas

El punzón se moverá durante el análisis. Para definir el movimiento, debe definirse una tabla de tiempo frente a velocidad. La distancia axial de la sección recta del punzón y la pieza es de 0.1488. Este valor se puede determinar con el comando DISTANC en la segunda página del menú UTILITIES.

Como ya se ha indicado anteriormente, este vacío será cubierto en 0.4 segundos. Tan pronto como la parte horizontal del punzón toca con la pieza, se producirá un retroceso, y la opción “release” será activada. De cara a completar la separación en este único incremento, el punzón se retirará a alta velocidad.

Para definir la tabla se empleará la siguiente secuencia de botones.

MAIN

CONTACT

CONTACT BODIES

TABLES

NEW

1 INDEPENDENT VARIABLE

NAME

punch_motion

TYPE

time



OK

ADD

0 0.1488/0.4 (0.1488/0.4 = velocidad)

0.4 0.1488/0.4

0.4 -10*0.1488/0.4 (-10*velocidad)

0.5 -10*0.1488/0.4

FIT

SHOW TABLE

SHOW MODEL

(Seleccionar SHOW MODEL para volver a la vista del modelo)

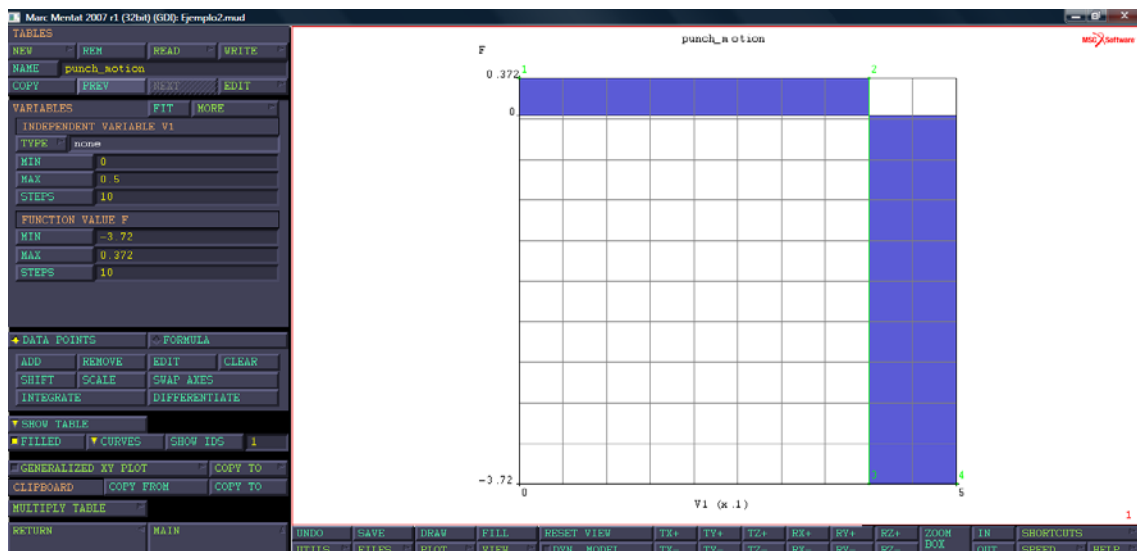


Figura 85. Velocidad en función del tiempo

La siguiente secuencia de botones asignará la tabla al movimiento del punzón (hay que tener cuidado puesto que el cuerpo que está activo ahora mismo es el body 3, ¡el plato soporte!)

MAIN

CONTACT

CONTACT BODIES

body control velocity PARAMETERS (para activar el cuerpo 2 (body 2))

CONTACT BODY PROPERTIES

velocity X

1



velocity x TABLE
punch_motion
OK (dos veces)

Paso 5: Definir los pasos incrementales y los parámetros de convergencia.

Las loadcases describen la primera y segunda parte de la historia de cargas y las cargas usadas durante estas partes. Para crearlas se seguirán los pasos indicados a continuación:

MAIN

LOADCASES

NAME

indent

mechanical STATIC

LOADS

OK

TOTAL LOADCASE TIME

0.4

STEPS

100

SOLUTION CONTROL

MAX # RECYCLES

20

OK

OK

NEW

NAME

release

mechanical STATIC

LOADS

OK

TOTAL LOADCASE TIME

0.1

STEPS

1
SOLUTION CONTROL
MAX # RECYCLES
20
OK
CONTACT
CONTACT RELEASES
SELECT
punch
OK

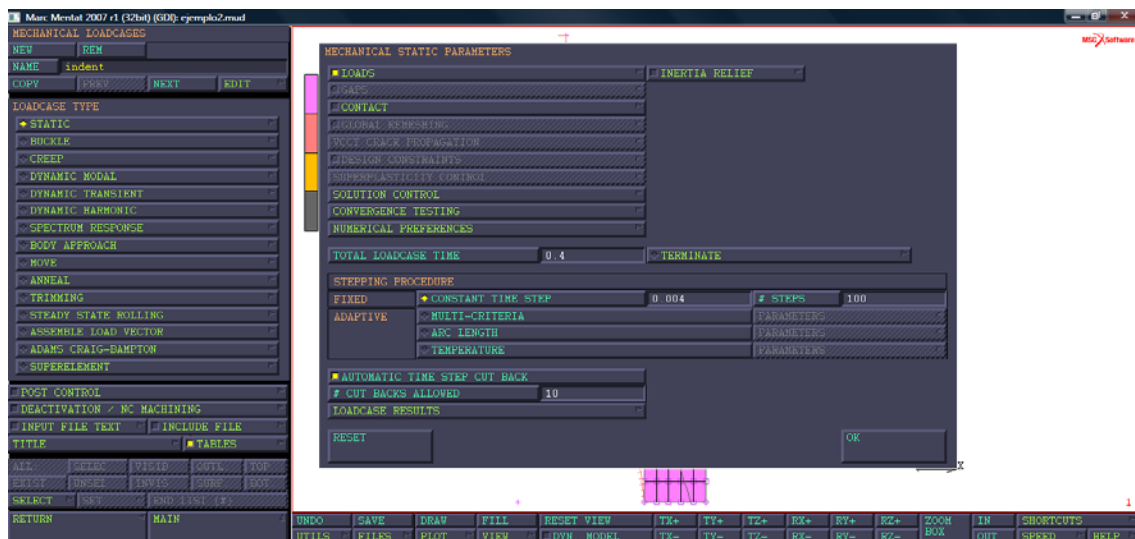


Figura 86. Especificación del time step y el número de incrementos

Paso 6: Activar los parámetros de grandes deformaciones y lanzar el caso.

El paso final dentro del bloque de pre-procesado (preprocessing) es crear el caso y lanzarlo. En este menú se definen las opciones especiales de análisis, los resultados salvados, y otros parámetros globales. Aquí es donde podemos seleccionar las solicitudes a aplicar en el orden seleccionado. Para crear el caso y lanzarlo se deben operar como se indica a continuación:

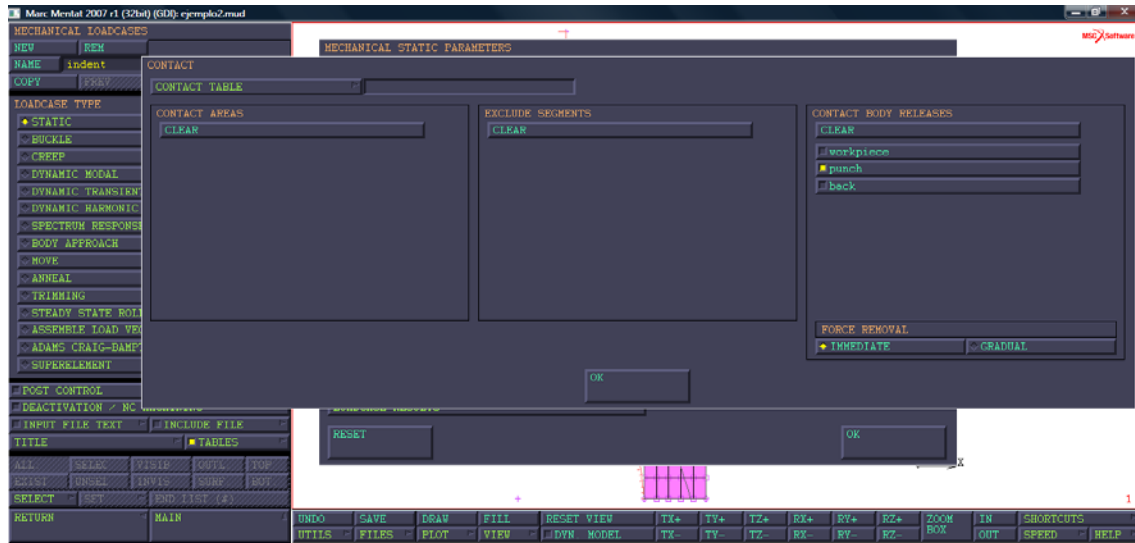


Figura 87. Especificación de la separación del contacto entre cuerpos.

MAIN

JOBS

MECHANICAL

available loadcases

indent

release

ANALYSIS OPTIONS

ADVANCED OPTIONS

CONSTANT DILATATION (on)

OK

plasticity procedure SMALL STRAIN

(Cambiar modo de grandes deformaciones)

JOB RESULTS

available element tensors

Stress

available element scalars

Equivalent Von Mises Stress

Total Equivalent Plastic Strain

OK

AXISYMMETRIC

(Esto asegura que se usa el elemento por defecto tipo 10)

OK



SAVE

RUN

SUBMIT 1

MONITOR

La opción MONITOR continuamente actualizará la carga del archivo de solución y mostrará los resultados al usuario hasta completar el análisis. Según la preferencia, si nos interesa, también sería posible ver las deformaciones y tensiones durante el análisis, en una opción del menú RESULTS.

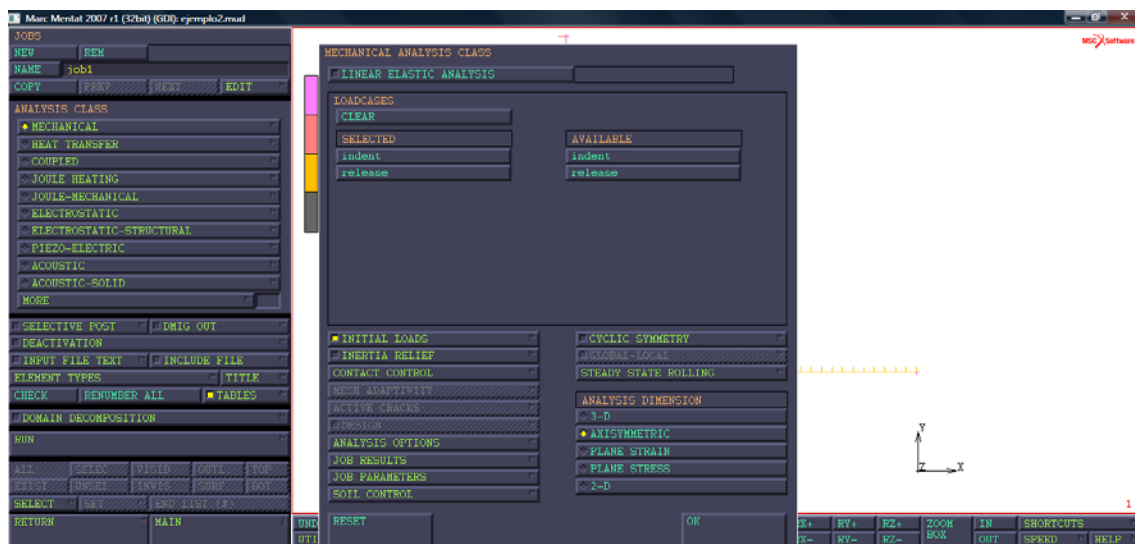


Figura 88. Selección de las opciones del caso

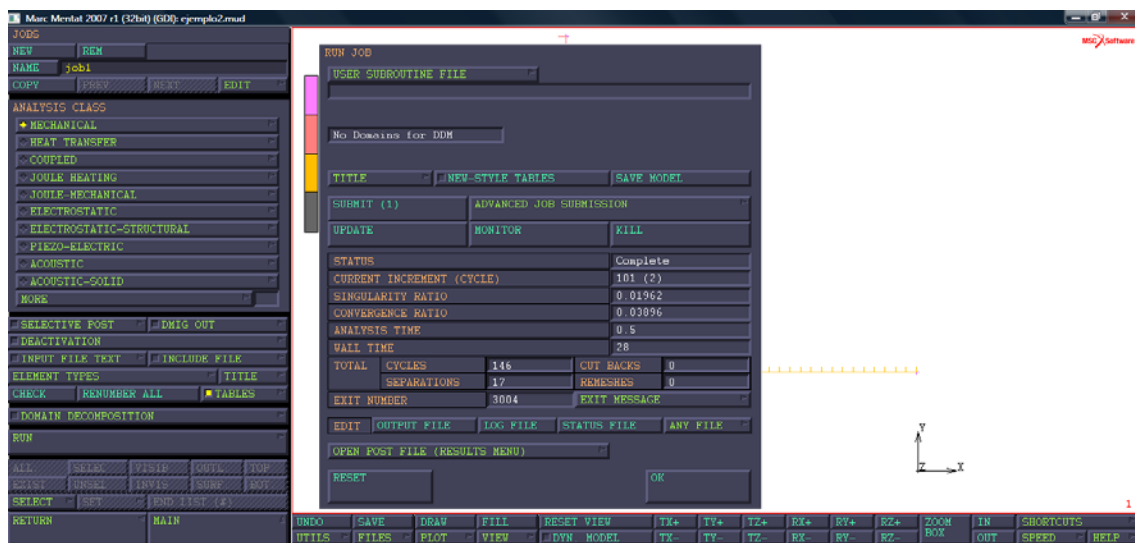


Figura 89. Análisis del caso completado



Paso 7: Post procesado de los resultados mostrando la estructura deformada y las tensiones y deformaciones residuales.

El análisis requiere la forma deformada final y las tensiones en ese momento. La siguiente secuencia de comandos nos permitirá extraer los resultados:

```
MAIN
  RESULTS
    OPEN DEFAULT
    FILL
    PLOT
      draw NODES (off)
      elements SETTINGS
      draw OUTLINE
    RETURN
  RETURN
  DEF & ORIG
  SCALAR
    Equivalent Von Mises Stress
    OK
  CONTOUR BANDS
  MONITOR
```

La deformada muestra que el borde de 90 grados está bien desarrollado. Así mismo, muestra las tensiones finales tras la operación. El último incremento (101) muestra las tensiones residuales después de haber retirado el punzón.

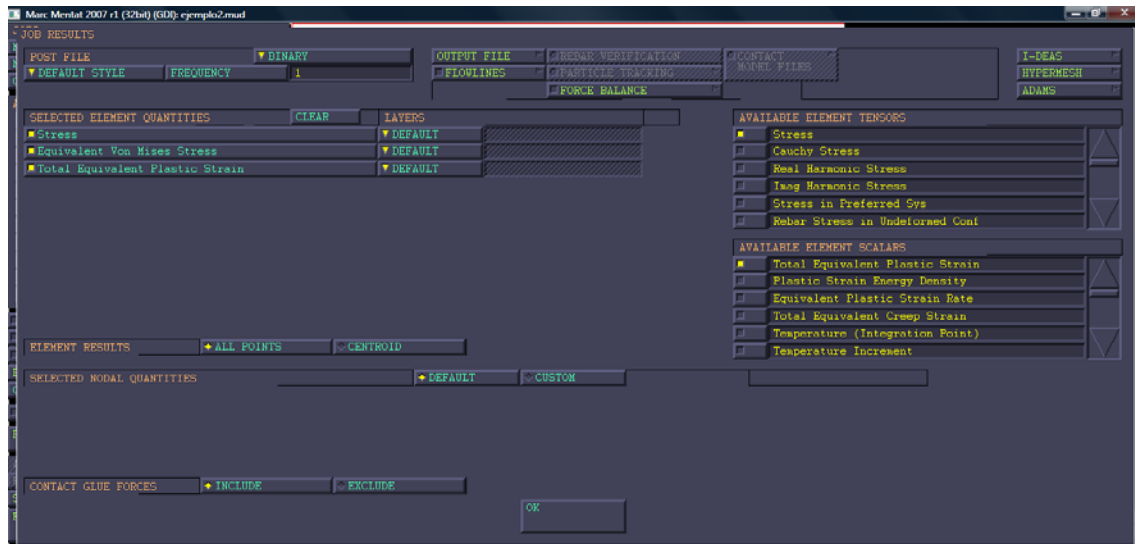


Figura 90. Selección de variables a grabar en el archivo de post resultados

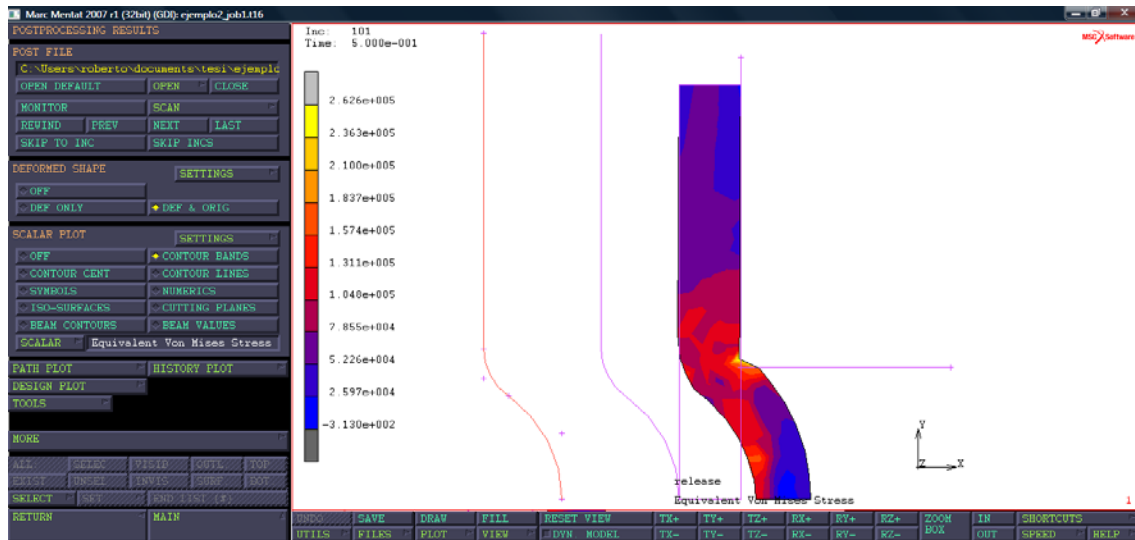


Figura 91. Deformaciones y tensiones tras la recuperación elástica

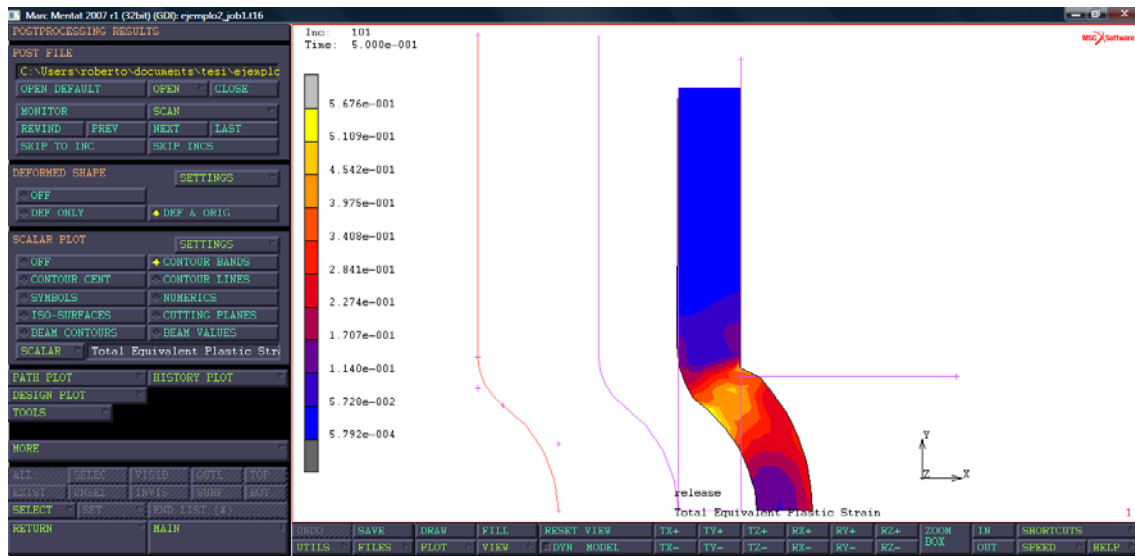


Figura 92. Tensión total plástica equivalente tras la recuperación elástica



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60



7.1 ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Este capítulo trata de los procedimientos experimentales dirigidos a realizar pruebas de conformado a la temperatura de 50°C de la aleación superplástica de PbSn60. Dichas pruebas han sido realizadas en el Laboratorio de Tecnologías y Sistemas de conformado de la Universidad de Cassino. En particular, además de su descripción, vendrán tratadas las características técnicas de los instrumentos utilizados en el curso del estudio. En resumen, la actividad puede ser dividida en dos fases:

- **Fase 1:** Preparación del material. Esta primera parte se referirá a la preparación del material, que trámite un conformado mecánico, permitirá obtener un grano cristalino óptimo para realizar el conformado superplástico del material.
- **Fase 2:** Conformado superplástico. En esta fase, el molde vendrá calentado hasta la temperatura del ensayo para efectuar después el conformado propiamente dicho.

El material utilizado para la actividad experimental es una aleación ferrosa constituida del 60% en peso de Plomo y el restante 40% de Estaño, disponible comercialmente bajo forma de barras de soldadura denominada con la sigla Pb60Sn40 o bien PbSn60.

Los experimentos de conformado libre a P constante han permitido evaluar algunas variables características del material. Para ello se ha evaluado el tiempo transcurrido para alcanzar ciertas configuraciones de las láminas deformadas.



7.1.1 **Puesto de conformado**

A continuación se explica brevemente el proceso de conformado superplástico para dar una idea general al lector de los pasos principales, los equipos y la maquinaria que componen el puesto de conformado, sobre el que se realizarán las pruebas experimentales.

En el conformado a presión, la lámina oportunamente preparada, viene fijada entre dos moldes, llamados *inferior* y *superior*.

Entre la lámina y los moldes se crea la cámara de conformado. Esta viene presurizada por el aire que deforma la lámina, haciéndole asumir formas particulares según el molde superior utilizado, que actúa como variador de las deformaciones inducidas. En este estudio, el material nunca llega a adquirir deformaciones tan elevadas como para adoptar la forma del molde superior, sino que se deforma adquiriendo forma de semiesfera. Esto es debido a las condiciones particulares de presión y temperatura, así como a las características del material.

La presión se obtiene usando un compresor, mientras el control de alimentación del fluido deformante se confía a una válvula proporcional. Ésta, se encuentra conectada a un generador de tensión que mantiene todo el circuito a la presión deseada.

Además, las láminas utilizadas en las pruebas de conformado son obtenidas a través de diversos trabajos de laminación, que aseguran un grano muy fino del metal.

Los detalles de preparación de las láminas son explicados en el apartado de preparación de las láminas.

En las **Figuras 93 y 94** se representa el esquema del puesto en el laboratorio:

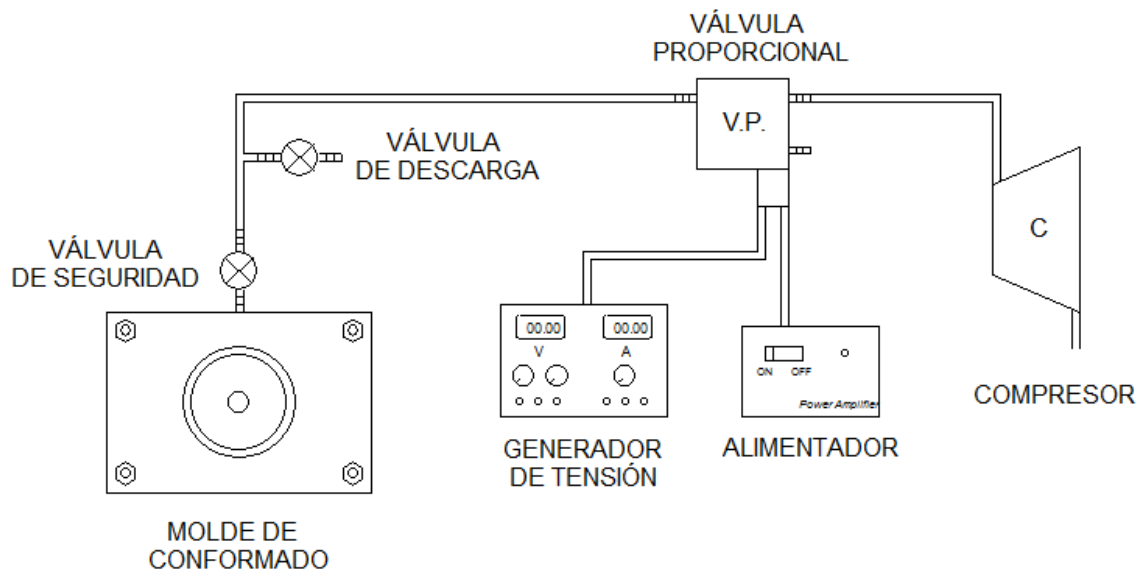


Figura 93. Esquema de la planta de conformado

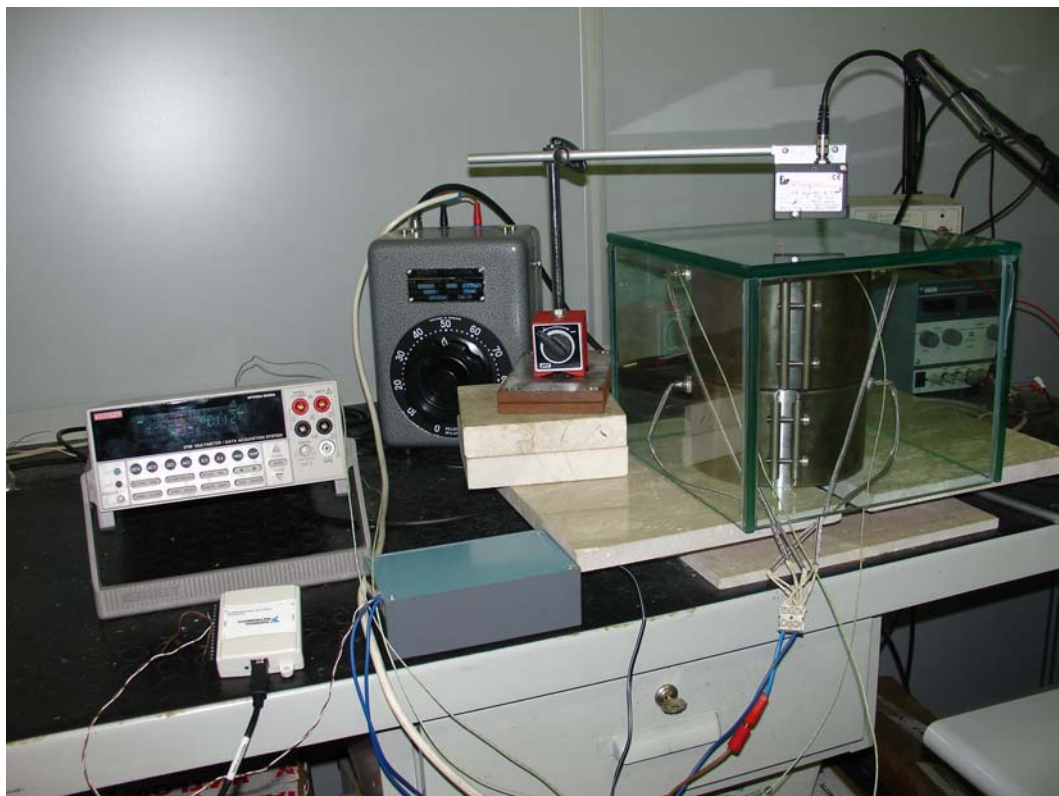


Figura 94. Puesto de conformado

7.1.2 Equipos

7.1.2.1 Molde

El molde se ha diseñado para poder resistir a valores de altas presiones, no superiores a 0.5 Mpa. Éste se ha realizado en dos partes: una superior y una inferior (ver **Figura 95**)

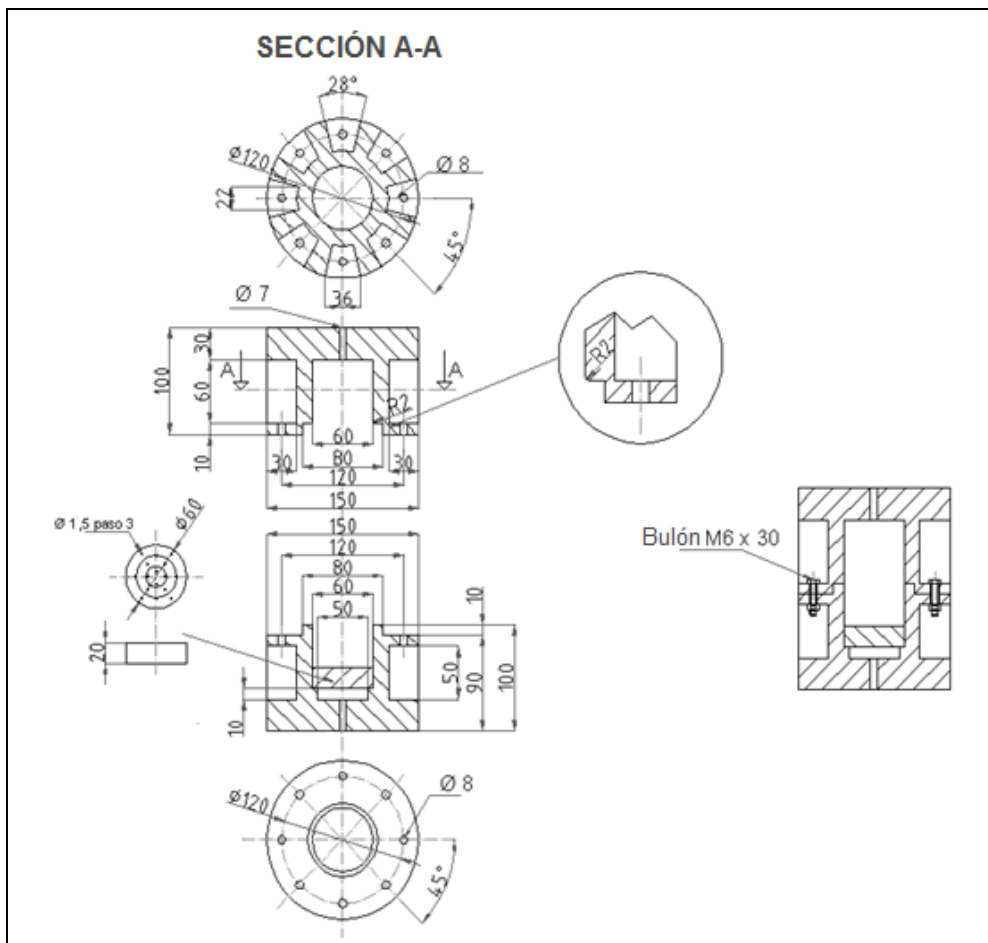


Figura 95. Molde circular

La parte inferior del molde (**Figura 96**) presenta un diámetro máximo de 150 mm. y una cavidad de diámetro de 60 mm, a la cual llega el aire a la presión deseada a través de un agujero roscado que une el molde con el resto del circuito. La regulación de la entrada de aire se realiza a través de una válvula de mariposa presente en el circuito.



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.1 *Análisis Experimental*

Sobre la parte superior de la cavidad inferior se apoya la lámina que se someterá al conformado, gracias a la acción del aire a presión.

La parte superior del molde (**Figura 97**) es geométricamente similar a la parte inferior. Actúa como contra molde, para sujetar con firmeza la lámina contra el molde, y así evitar la salida de aire a presión durante el proceso de conformado.

Sobre la superficie superior existe un pequeño agujero de diámetro 7 mm, para permitir la introducción de un instrumento de medida (un láser medidor de distancias) en el interior del molde, y así medir la evolución de la altura de la lámina con el tiempo durante el proceso de conformado.

En sentido circunferencial se han efectuado ocho agujeros de diámetro 8 mm. para permitir la introducción de otros tantos bulones M6x30, con la función de fijación y cierre del molde.

En definitiva, se han realizado unas hendiduras para permitir la manipulación de los bulones de fijación por parte del usuario.

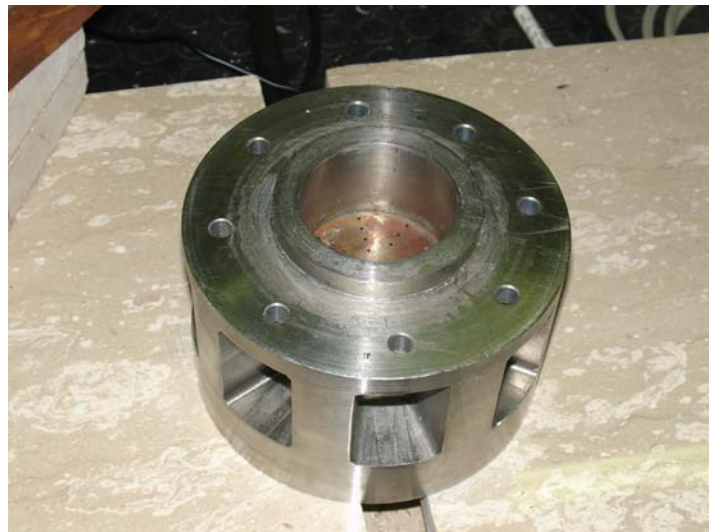


Figura 96. Parte inferior del molde



Figura 97. Parte superior del molde

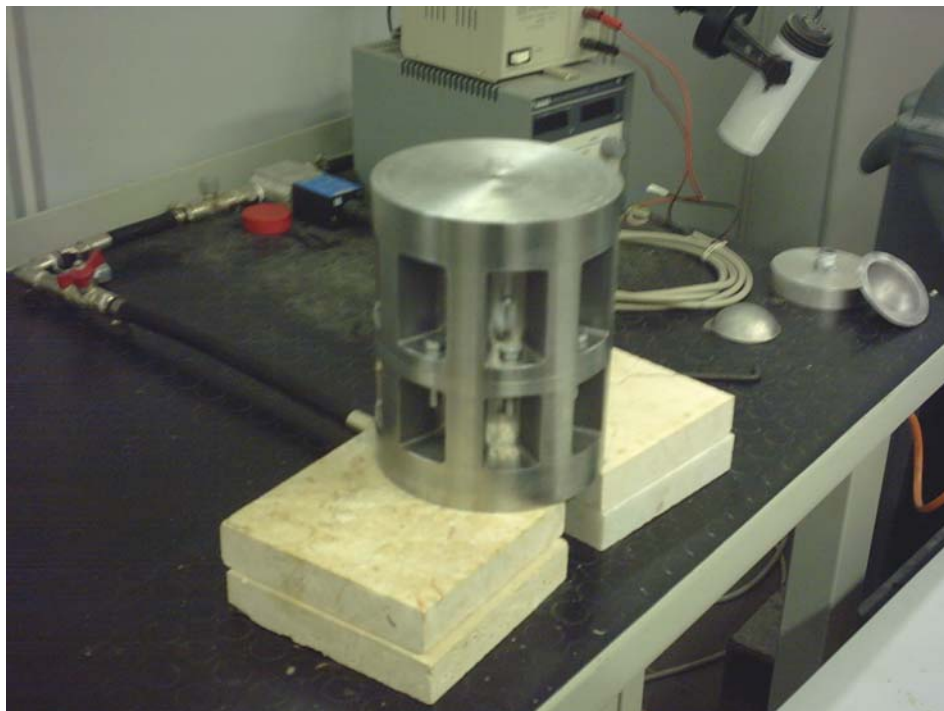


Figura 98. Molde ensamblado



Figura 99. Lámina de ensayo después del conformado. Vista superior



Figura 100. Lámina de ensayo después del conformado. Vista frontal

En las **Figuras 99 y 100** se muestran dos vistas de una probeta después de ser sometida al proceso de conformado. Se puede observar como el punto de rotura corresponde al punto central de la semiesfera.

7.1.2.2 Termopar

El termopar (**Figura 101**) es un instrumento de medida de la temperatura muy difundido en las aplicaciones industriales y está basado en fenomenologías de tipo eléctrico. Con el término termopar se identifica una pareja de hilos de metales distintos unidos entre ellos generalmente mediante soldadura autógena. Tal conjunto de hilos, introducidos en un oportuno circuito genera, al variar su temperatura, una fuerza electromotriz, función del par de metales utilizados y de la temperatura. El circuito termoeléctrico más simple es aquel obtenido por dos hilos de metal A y B con los conjuntos A-B y B-A, inmersos en dos focos a temperatura distinta, T_1 y T_0 . La diferencia de potencial $E_{A,B}$ que se detecta a los extremos es función única de la

diferencia de temperaturas T_1-T_0 . Se puede afirmar que en un campo amplio de temperaturas (200÷600°C), el empleo de los termopares es en muchos casos alternativo a las termoresistencias más precisas, respecto de las cuales los termopares presentan tanto mejores características dinámicas (tiempos de respuesta del orden de décimas de segundo), como un menor coste. Entre las desventajas se pueden destacar la medición de la temperatura de forma no absoluta, sino relativa (con la consecuente necesidad de un conjunto de referencia a una temperatura conocida) y la presencia de un sensible decaimiento de sus prestaciones metrológicas, y en consecuencia, una baja estabilidad en el tiempo.

Para temperaturas elevadas los termopares se plantean, además, en alternativa a los pirómetros de radiación total y a los ópticos. En estos dos últimos casos juega a favor de los termopares la simplicidad del circuito de medida y el menor coste, y en contra, la posibilidad de un rápido deterioro en particulares condiciones ambientales.

El termopar utilizado en este estudio es el tipo K-Chromel (90% Ni, 10% Cr) / Alumel (94% Ni, 3% Mn, 2% Al, 1% Si). Ha nacido para sustituir los termopares de metal noble a elevadas temperaturas, de hecho puede ser utilizado hasta los 1260°C con una incertidumbre de $\pm 2^\circ\text{C}$ en atmósferas inertes u oxidantes. Una desventaja que tiene es que presenta problemas de reproducibilidad y estabilidad.. Es un termopar, cuya utilización se está extendiendo rápidamente por a su elevado poder termoeléctrico. Se usa en el campo de 0-870°C con una precisión de $\pm 1.5^\circ\text{C}$.

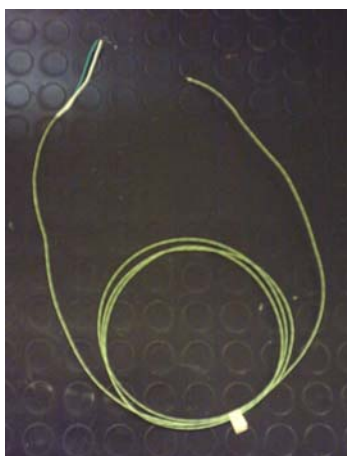


Figura 101. Termopar

7.1.2.3 *Bandas calefactoras*

Las bandas calefactoras (**Figura 102**) se han utilizado para calentar el molde por conducción.

Presentan una forma cilíndrica, dado que envuelven directamente la superficie externa del molde. Es posible ajustar perfectamente la superficie interna de las bandas con la superficie externa del molde.

De la superficie externa de las bandas salen 4 hilos acoplados dos a dos (positivo-negativo). Éstos están hechos de tal manera que conduzcan la corriente para llevar a cabo el calentamiento de las propias bandas de calefacción.

Los elementos calefactores han sido fabricados por la casa constructora WATLOW con sede en St.Louis, Missouri. La temperatura máxima a la cual pueden operar las bandas de calefacción es aproximadamente 760°C.



Figura 102. Bandas calefactoras



Figura 103. Molde preparado para el conformado superplástico

7.1.2.4 Compresor

Dado que la aleación de PbSn utilizada no presenta problemas particulares de oxidación o degradación química al ponerla en contacto con el aire, no ha sido necesario usar gases inertes para el conformado. El compresor (**Figura 104**) utilizado es un Fini, con un depósito de 50 l. y un motor de 1.1 kW, que puede asegurar un flujo constante de 106 l. de aire por minuto y puede alcanzar una presión máxima de 0.784 MPa.



Figura 104. Compresor

7.1.2.5 Multímetro

Para la lectura de los valores de temperatura y de presión en el interior del molde se ha utilizado un multímetro (**Figura 105**), en particular el modelo 2700 de la casa constructora KEITHLEY.

Éste es un multímetro/sistema de adquisición de datos a alta precisión con una resolución de 6 dígitos. Puede medir voltajes (CA/CC), corriente (CA/CC), resistencia (de 2 o de 4 hilos), temperaturas (termopar, termistor y termómetro de resistencia), frecuencia y periodo.

El modelo 2700 posee dos ranuras para la inserción de tarjetas multicanal de la serie Keithley, modelo 7700. Cada canal de la tarjeta se monitoriza por el modelo 2700 y se puede establecer un canal para cada medida.

Los campos de medida para el voltaje y la corriente son los siguientes:

- 0.1 μ V a 1000V, para medida de voltajes en corriente continua.
- 0.1 μ V a 750V, para medida de voltajes en corriente alterna.
- 10 nA a 3°, para medida de intensidades en corriente continua;
- 1 μ V a 3A, para medida de intensidades en corriente alterna.



Figura 105. Multímetro

7.1.2.6 *Válvula proporcional y generador*

La válvula proporcional utilizada es una FESTO modelo MPPE-3-1/8-10-010B (**Figura 106**). Está acoplada a un generador de tensión variable que permite regular la presión en el interior del circuito. Un sensor de presión, integrado en la válvula, detecta el valor de presión de la línea y envía una señal eléctrica, proporcional a la lectura, al control electrónico que compara el valor de presión detectado con aquel impuesto por el alimentador externo. Si los valores son diferentes, el actuador de la válvula regula su apertura de tal modo que los nivela y, en particular, si el valor leído es superior a aquel impuesto, la válvula se encarga de disminuir la presión en la línea mediante ventilación.



Figura 106. Válvula proporcional

En la siguiente tabla se resumen las especificaciones técnicas de la válvula.

MMPE-3-1/8-1-010B		
<i>Presión de trabajo</i>		Constante (prescindiendo de la fluctuación del aire de alimentación). Presión de ingreso al menos 1 bar superior al valor máximo de salida
<i>Pérdida normal (nueva)</i>		<5 l/h max
<i>Campo de temperatura admitido</i>		0...+60°C
<i>Tensión de alimentación admitida</i>		+18...max 30 V DC (valor aconsejado +24 V DC)
<i>Salida en corriente referida a 10 V DC</i>		<5 mA
<i>Potencia absorbida</i>		Max 3.6 W ($U_{vmax}=30$ V DC)
<i>Linealidad</i>		1% del campo de medida
<i>Valor variable nominal</i>		0...+10 V
<i>Flujo de salida</i>		180 l/min
<i>Campo de presión</i>	<i>Presión admitida en el ingreso</i>	Max 12 bar
	<i>Campo de control</i>	0...10 bar
<i>Histéresis</i>		Max 50 mbar (a la tensión de alimentación 20...30 V DC)
		Max 100 mbar (a la tensión de alimentación 18...20 V DC)

Tabla 3. Especificaciones técnicas de la válvula MPPE-3-1/8-10-010B

El funcionamiento de la válvula requiere la presencia de dos alimentadores, uno con la función de alimentar el actuador y el sistema de control, el otro con la función de regular la tensión en la entrada.

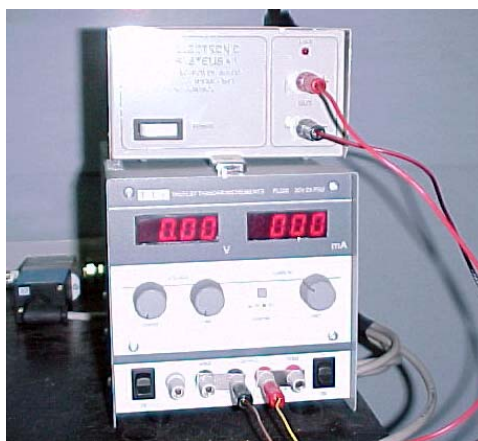


Figura 107. Alimentadores conectados a la válvula

7.1.2.7 Generador de tensión variable

Para la alimentación de las bandas calefactoras se ha utilizado un generador de tensión variable a través del cual es posible regular la tensión de alimentación (aunque se podría haber utilizado directamente la tensión de un enchufe tradicional). El motivo por el cual se ha introducido este generador ha sido para evitar una excesiva sollicitación térmica de las bandas calefactoras en caso de que las temperaturas de ensayo hubieran sido bajas.

El modelo del variador es V 10 NC (**Figura 108**) de la empresa Belotti Variatori. Las características técnicas se describen en la **Tabla 4**.



Figura 108. Generador de tensión variable

V 10 NC	
Tensión de entrada [V]	220
Tensión de salida [V]	0...220
Corriente máxima de salida [A]	4
Potencia máxima absorbida [W]	900

Tabla 4. Especificaciones técnicas del variador V 10 NC

7.1.2.8 Láser

La medida de la altura de la probeta se ha efectuado empleando un láser (**Figura 109**). Éste se puede utilizar para realizar medidas, sin contacto, y para comprobaciones de posición, desplazamiento, dimensiones, perfil de la superficie, deformación, vibraciones, y también para medidas de niveles de líquidos.



Figura 109. Láser

En particular, para las medidas de este estudio se ha elegido el modelo LDE 100 HS, de la casa constructora FAE, con sede en Milán. Sus características se indican en la **Tabla 5**.

LDE 100 HS		
Distancia base [mm]		100
Campo de medida [mm]		±30
Linealidad		±0.2% del campo di misura
Resolución		0.02% del campo di misura
Velocidad máxima de muestreo [Hz]		8
Diodo		≤5 mW, lunghezza d'onda 660 nm
Señal de salida	Digital	RS 232
	Analógica	4-20 mA (0-10 V)
Sincronización de entrada		2.4-5 V (CMOS, TTL)
Potencia de alimentación		18÷36 Vdc, 1.5 W
Salida máxima admitida		NPN: 100 mA max; 40 V max
Campo de temperaturas de trabajo [°C]		-10...+60
Peso (sin cable) [g]		100
Spot [mm]		<2
Clase del láser		2

Tabla 5. Especificaciones técnicas del láser.

El funcionamiento del láser está basado en el principio de la triangulación (**Figura 110**). La radiación láser de un semiconductor (1) es focalizada por una lente (2) sobre

la superficie de un objeto (6). La radiación es reflejada por la superficie y recibida por la lente (3), focalizándose así sobre una matriz lineal CMOS (4). Un procesador de señal (5) calcula la distancia del objeto a la posición del radio sobre la matriz (4).

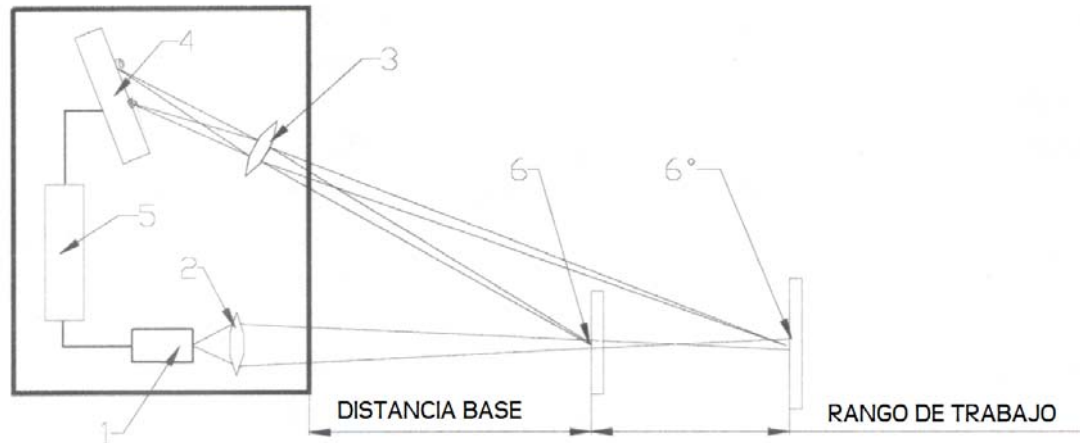


Figura 110. Esquema del principio de funcionamiento del láser

Para realizar la medida en el interior del molde ha sido realizada una hendidura de anchura 3 mm y largura 65 mm, con el fin de permitir la triangulación del radio; mientras para el centrado, ha sido realizado un agujero de diámetro 2.5 mm, por lo tanto con una tolerancia máxima de solo 0.5 mm.

7.1.2.8.1 Regresión lineal

Ya que la señal de salida del láser es una corriente, para poder saber el correspondiente valor en mm ha sido necesario efectuar un análisis de regresión. La regresión formaliza el problema de una relación funcional de la medida entre variables, basándose en una muestra de datos extraídos experimentalmente. Esta equivalencia había sido ya calculada por el director del proyecto, Don Gillo Giuliano para usos previos del láser.

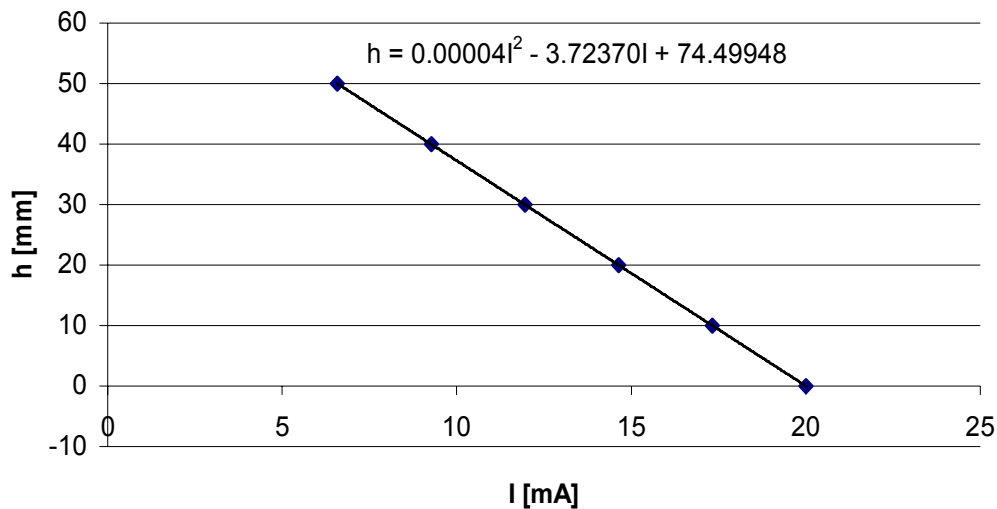


Figura 111. Curva de regresión lineal láser

7.1.3 *Sistemas de control*

En el presente estudio se ha utilizado el software LabVIEW con el fin de poder controlar y variar la temperatura de la lámina antes y durante el conformado. El programa efectúa un simple control de retroalimentación de la temperatura, y automáticamente envía, o no, corriente a las bandas calefactoras. El proceso de control puede ser sintetizado de la siguiente manera:

- Medida de la temperatura
- Verificación de si la temperatura es superior, o no, a un valor fijado.
- Envío, o no, de corriente a las bandas.

El control de la temperatura se realizó sobre la parte interior del molde, donde se encuentra la lámina, y entre el molde y la banda calefactora superior.

A través de ensayos experimentales se ha verificado que la diferencia de temperatura existente entre las bandas calefactoras y la lámina es de $\sim 20^{\circ}\text{C}$. Como comprobación, *antes del conformado*, se ha situado un termopar sobre la superficie superior de la lámina con el fin de medir la temperatura, comprobando así cuál es la diferencia con la temperatura de la cara exterior del molde (que es la que nosotros controlamos con el software). De este modo, conoceremos la temperatura de entrada que le tenemos que



indicar al programa para conseguir una determinada temperatura en el interior del molde, es decir, en la lámina.

Antes de efectuar las pruebas de conformado ha sido verificada también la homogeneidad de la temperatura sobre la superficie de la lámina, trámite una medida en 3 puntos diversos (una en el centro y dos en las proximidades del molde), que ha indicado una diferencia de temperatura inferior a una décima de grado.

Dado que la diferencia de temperaturas entre la lámina y el aire en contacto con la misma es prácticamente nula, consideramos que la lectura de temperaturas con el termopar en la zona próxima a la lámina es correcta.

El programa de control recibe la medida del multímetro y a través de una simple comparación verifica si la temperatura de la banda calefactora (el termopar se coloca en una de ellas, puesto que su temperatura es prácticamente la misma, estando ambas fabricadas por el mismo material) es superior al valor fijado, y si así fuese, interrumpe la alimentación de corriente. Cuando, por el contrario, ésta es inferior, envía corriente de nuevo hasta que la temperatura no supere el valor deseado. Para el envío, o no, de corriente a las bandas calefactoras el programa emplea una señal eléctrica que es recibida por un circuito, que actúa de interruptor.

7.1.4 Preparación de las láminas

Las aleaciones de PbSn60 están disponibles comercialmente bajo forma de barras. Para ser utilizado en la fase de conformado, el material es sometido a un proceso de laminación. El objetivo de tal proceso es principalmente romper los granos del material para obtener un grano extremadamente fino (dimensión de los granos menor de 10 μm). El proceso de laminación puede ser subdividido en 3 pasos:

1. Obtener 4 láminas de la laminación de 4 barritas;
2. Crear un multiestrato de 4 láminas de 0,3 mm. cada una, laminándolo hasta que no se hayan soldado y su espesor sea igual que el inicial de las láminas individuales del que está compuesto;

3. Doblar 4 veces sobre sí misma la lámina de este modo obtenida y laminarla hasta obtener la soldadura y un espesor final siempre igual que la lámina de partida (0,3 mm).

Siguiendo estos pasos es posible obtener láminas compuestas de numerosos estratos de espesor muy pequeño. De este modo, las dimensiones de los granos serán como máximo igual al espesor de una capa. El material así obtenido, está caracterizado de **granos finos y estables, condiciones necesarias para un comportamiento superplástico.**

La primera serie de laminaciones transforma las barras, caracterizadas por un espesor de 3,6 mm en láminas de espesor aproximado de 0,3 mm. Estas láminas después de haber sido oportunamente pulidas para evitar la presencia de polvo, perjudicial para la soldadura, vienen superpuestas de cuatro en cuatro.

Cada grupo, formado por 4 láminas, se lamina hasta alcanzar de nuevo un espesor de aproximadamente 0,3 mm.

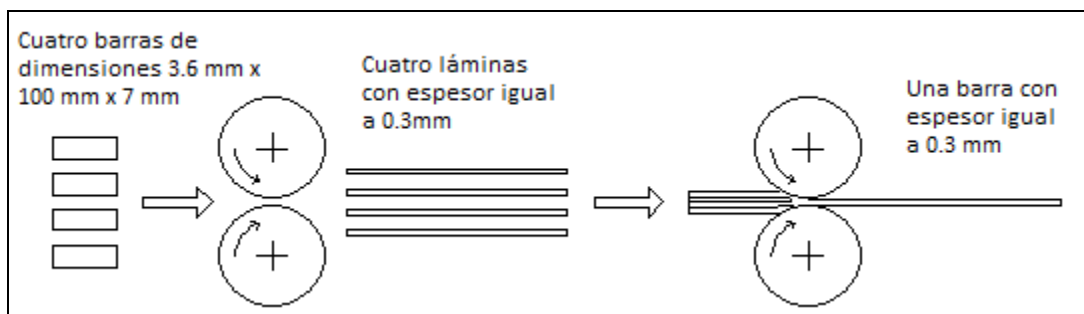


Figura 112. Operaciones de laminación

Obviamente, las láminas se alargan en la dirección de laminación mientras que la anchura permanece constante. Se obtendrán, por lo tanto, láminas de anchura y largura igual a 100 mm y 336 mm respectivamente.

Sucesivamente se aplican, a la lámina ya formada por cuatro estratos, cuatro ciclos de plegado. Después de cada ciclo, y antes de efectuar el sucesivo, el material se lamina hasta alcanzar de nuevo el espesor de unos 0,3 mm.

Los ciclos de plegado son de dos tipos (**Figura 113**). En el primero y el cuarto el material se plegará sobre sí mismo 3 veces; de este modo se obtienen 8 niveles superpuestos. En el segundo y tercer ciclo, por el contrario, el material se pliega sobre sí mismo 2 veces, obteniendo así, cuatro niveles superpuestos.

Recordando que la lámina de partida está formada por cuatro estratos, después del primer ciclo serán 32 (4x8), después del segundo ciento veintiocho (32x4), tras el tercero quinientos doce (128x4), y finalmente, tras el cuarto y último ciclo, serán cuatro mil noventa y seis (512x8) estratos.

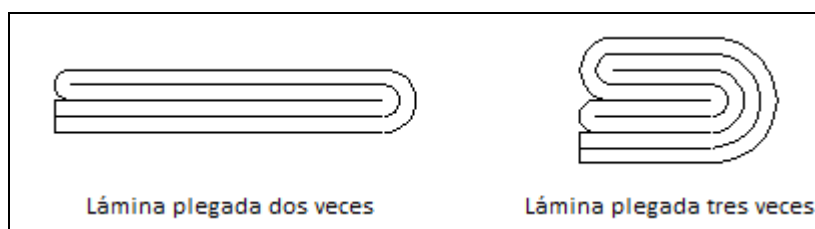


Figura 113. Ciclos de plegado

Llegados a este punto, de una única barra de PbSn60 se han obtenido 4 láminas de forma rectangular aproximadamente de dimensiones 80mm x 100mm y de espesor igual a 0.3mm.

7.1.4.1 Laminador

Las operaciones de laminación han sido realizadas con el laminador M.D.M.LS120 (**Figura 114**), adecuado para la laminación de las aleaciones no ferrosas. Esta máquina viene accionada por un motor eléctrico, que transmite el movimiento, por medio de engranajes helicoidales, al par de cilindros. En la tabla siguiente se presentan los datos técnicos del laminador:

Laminador M.D.M. LS 120	
Ancho de los rodillos	120 mm
Diámetro cilindros	54 mm
Máxima apertura cilindros	7 mm
Alimentación monofásica	220 V, 50 Hz
Peso	60 Kg
Características motor eléctrico	1 CV, 1550 rpm
Velocidad de laminación	3.95 m/min

Tabla 6. Características del laminador M.D.M. LS 120



Figura 114. Laminador

7.1.5 Caracterización mecánica de la aleación PbSn60

El objetivo en la segunda fase de la actividad experimental es determinar los coeficientes “m” y “K”, relativos al material estudiado, para comprender su comportamiento durante el proceso de conformado a temperatura igual a 50°C. Para poder calcular estos dos parámetros, suponemos que tenemos una configuración de la lámina, durante el proceso de conformado, que va adquiriendo la forma de una esfera de radio ρ (Figura 115).

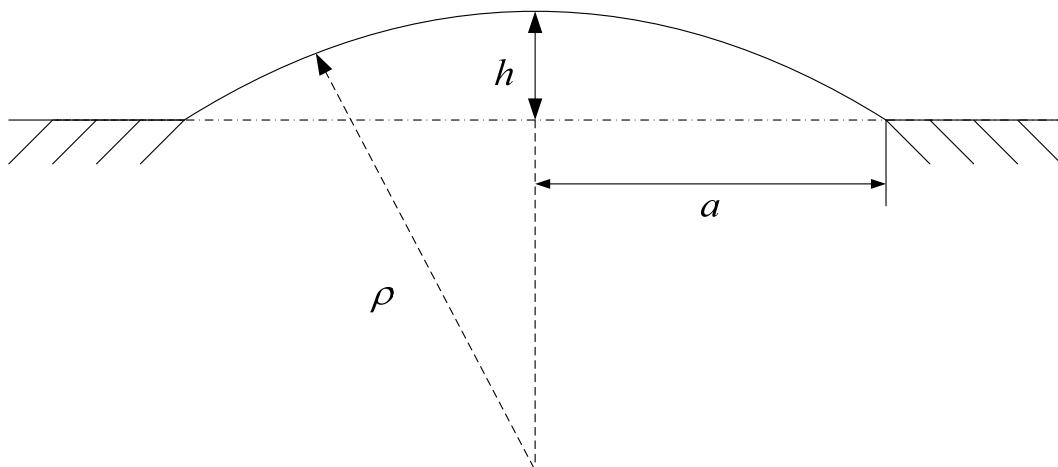


Figura 115. Configuración de la lámina en conformado



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.1 Análisis Experimental

El radio inicial de la esfera es “a” mientras que “h” indica cuánto se está desplazando la lámina. Del teorema de Pitágoras podemos escribir:

$$\rho^2 = a^2 + (\rho - h)^2 \quad (1)$$

De la cual;

$$\rho^2 = a^2 + \rho^2 - 2\rho h + h^2 \Rightarrow 2\rho h = a^2 + h^2 \Rightarrow \rho = \frac{a^2 + h^2}{2h}$$

Introduciendo el parámetro $H = \frac{h}{a}$, adimensional, tendremos:

$$\rho = a \left(\frac{H^2 + 1}{2H} \right) \quad (2)$$

Del volumen constante, igualamos el volumen inicial de la lámina y el volumen en un cierto instante de tiempo, y tendremos;

$$\pi a S_0 = \pi (a^2 + h^2) S \Rightarrow S = \frac{a^2 S_0}{a^2 + h^2}$$

Donde S_0 es el espesor inicial de la lámina y S es el espesor de la lámina en un instante genérico.

Para expresar el espesor en función del parámetro “H” obtendremos:

$$S = \frac{S_0}{1 + H^2} \quad (3)$$

Llegados a este punto, después de haber expresado “ ρ ” y “ S ” en función de “H”, a través de las ecuaciones (2) y (3), introducimos la relación proporcionada por la Ley de Hollomon:

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^m \quad (4)$$

Donde " $\bar{\sigma}$ " es la tensión equivalente, " K " es el coeficiente de resistencia del material, " $\bar{\dot{\epsilon}}$ " es la velocidad de deformación equivalente y " m " es el índice de sensibilidad a la velocidad de deformación. De esta ecuación obtendremos " K " y " m ". El concepto de tensión y deformación equivalente parte de algunas consideraciones.

Imaginemos una lámina de espesor sutil sujeta a presión interna (**Figura 116**)

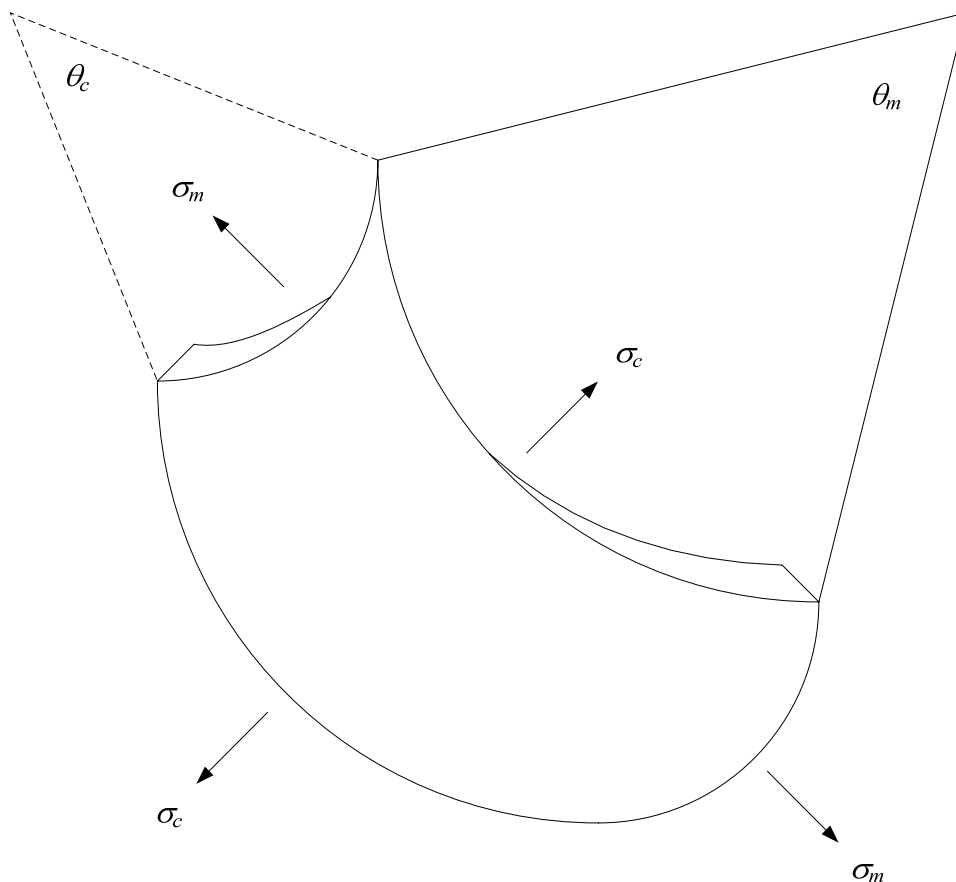


Figura 116. Esquema de las deformaciones y de las tensiones

La presión actúa paralelamente a la normal de la superficie, mientras las tensiones agentes en las genéricas direcciones, " σ_c " y " σ_m ", están presentes pues la lámina en cuestión ha sido "cortada" de una mayor para realizar este análisis. La vista frontal de la lámina (**Figura 117**) nos es útil para la resolución de nuestro problema:

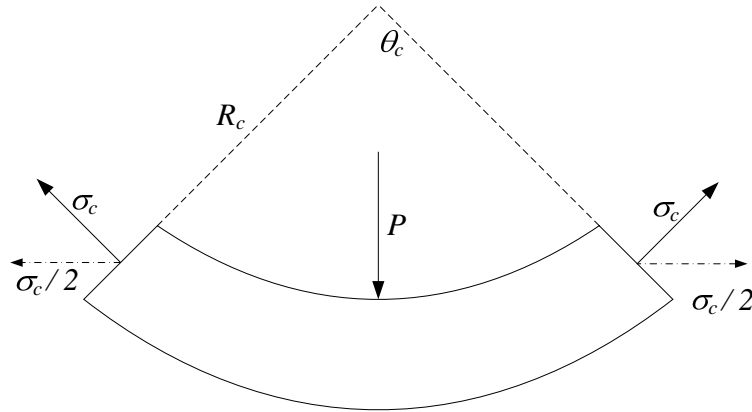


Figura 117. Esquema normal de las tensiones

Procedemos haciendo el equilibrio de fuerzas a lo largo de la dirección de la presión “P”:

$$2\sigma_c \sin \frac{\theta_c}{2} R_m \vartheta_m S + 2\sigma_m \frac{\vartheta_m}{2} R_c \vartheta_c S = PR_m \vartheta_m R_c \vartheta_c$$

Dividiendo por $S(R_m \vartheta_m R_c \vartheta_c)$ obtendremos:

$$\frac{P}{S} = \frac{\sigma_c}{R_c} + \frac{\sigma_m}{R_m} \quad (5)$$

Para relacionar las deformaciones a las tensiones en campo plástico, podemos utilizar las siguientes relaciones:

$$d\varepsilon_1 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} [\sigma_1 - 0.5(\sigma_2 + \sigma_3)]$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} [\sigma_2 - 0.5(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (6)$$

$$d\varepsilon_3 = \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} [\sigma_3 - 0.5(\sigma_1 + \sigma_2)]$$



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.1 *Análisis Experimental*

Donde “ $\bar{\varepsilon}$ ” y “ $\bar{\sigma}$ ”, son respectivamente deformación equivalente y tensión equivalente, y pueden ser calculadas mediante el criterio de resistencia de Von Mises:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (7)$$

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2} \quad (8)$$

A continuación, vamos a evaluar lo que ocurre a nuestra lámina instante por instante, con un estado de tensión biaxial (despreciando el efecto a lo largo del espesor).

Asumimos $\sigma_c = \sigma_1$, $\sigma_m = \sigma_2$, $\sigma_3 = 0$ y despreciamos las deformaciones elásticas.

Dado que la configuración de la lámina es una tapa esférica, el radio de curvatura “ ρ ” se mantiene constante:

$$R_c = R_m = \rho$$

Hipotizando además que el estado de tensión biaxial sea equilibrado, por el cual de la ecuación (5):

$$\sigma_c = \sigma_m = \frac{P\rho}{2S} = \bar{\sigma} \quad (9)$$

Calculamos la “ $\bar{\sigma}$ ” a través de la ecuación (7):

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_c - \sigma_m)^2 + \sigma_c^2 + \sigma_m^2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{2\sigma_c^2} = \sigma_c$$

De las tres ecuaciones expresadas en la ecuación (6) se llega a:

$$d\varepsilon_c = d\varepsilon_m \text{ en cuanto } d\varepsilon_1 = d\varepsilon_2$$



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.1 Análisis Experimental

Integrando:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m \text{ y } \dot{\varepsilon}_c = \dot{\varepsilon}_m$$

De la ecuación (8), obtenemos:

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(d\varepsilon_c - d\varepsilon_m)^2 + (d\varepsilon_c + 2d\varepsilon_c)^2 + (d\varepsilon_c + 2d\varepsilon_c)^2} = 2d\varepsilon_c = -d\varepsilon_s$$

Dado que $\varepsilon_s + \varepsilon_m + \varepsilon_c = 0$; por lo cual $\varepsilon_s = -2\varepsilon_c$, habiendo indicado con " ε_s " la deformación a lo largo del espesor.

Regresando a la ley de Hollomon (4), calculamos la " $\bar{\varepsilon}$ "

$$\bar{\varepsilon} = \left(\frac{\bar{\sigma}}{K} \right)^{1/m} \quad (10)$$

Expresando " $\bar{\sigma}$ " y " $\bar{\varepsilon}$ " en función del parámetro "H", obtenemos:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\dot{S}}{S} = -\frac{2H\dot{H}}{1+H^2}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{P\rho}{2S} = \frac{Pa}{4HS_0} (1+H^2)^2$$

Insertando estas expresiones en la ecuación (10), tendremos:

$$\left(\frac{Pa}{4S_0K} \right)^{1/m} = - \left[\frac{H}{(1+H^2)^2} \right]^{1/m} \frac{2H}{1+H^2} \frac{dH}{dt}$$

O sea, integrando entre un instante inicial y uno genérico el primer miembro:



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.1 Análisis Experimental

$$\int_0^t \left(\frac{Pa}{4S_0 K} \right)^{1/m} dt = - \int_0^H \left[\frac{H}{(1+H^2)^2} \right]^{1/m} \frac{2H}{1+H^2} dH \quad (11)$$

Resolviendo las integrales:

$$\left(\frac{Pa}{4KS_0} \right)^{1/m} t = I(H, m)$$

Donde “ $I(H, m)$ ” es el resultado de la integral del segundo miembro de la ecuación (11), función de “ H ” y de “ m ”.

Asumiendo la condición de $H=1$, o $h = a$, y utilizando dos valores de presión distintos, obtenemos:

$$\left(\frac{P_1 a}{4KS_0} \right)^{1/m} t_1 = I(1, m) \quad (12)$$

$$\left(\frac{P_2 a}{4KS_0} \right)^{1/m} t_2 = I(1, m) \quad (13)$$

Igualando las ecuaciones (12) y (13):

$$\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/m} = \frac{t_2}{t_1}$$

De la cual:

$$\frac{1}{m} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right) = \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \Rightarrow m = \frac{\ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)}{\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)} \quad (14)$$



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.1 *Análisis Experimental*

Una vez obtenida la expresión de “ m ”, la introducimos en las ecuaciones (12) y (13) para poder obtener “ K ”:

$$K = \frac{P_1 a}{4S_0} \left(\frac{t_1}{I(1, m)} \right)^m \quad (15)$$

$$K = \frac{P_2 a}{4S_0} \left(\frac{t_2}{I(1, m)} \right)^m \quad (16)$$

7.1.6 **Resultados**

Para caracterizar el material, PbSn60, se han realizado ensayos a cinco presiones diferentes, efectuándose dos pruebas para cada una de ellas. Las presiones de trabajo son 0,06MPa, 0,07MPa, 0,08MPa, 0,09MPa y 0,1MPa.

A continuación se presentan las gráficas que representan los datos obtenidos experimentalmente. En estas gráficas se muestra la evolución en el tiempo de la altura de la probeta, durante la prueba de conformado por efecto del gas a presión.



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.1 *Análisis Experimental*

PbSn60 (50°C) P=0,06MPa

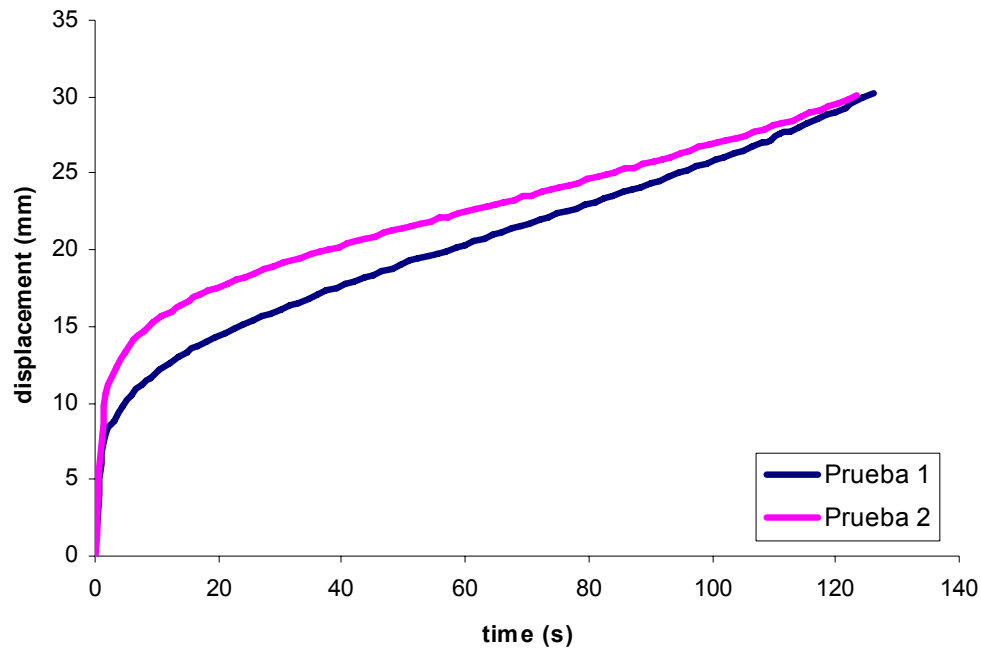


Figura 118. Ensayo PbSn60 (50°C) a P=0,06MPa. Pruebas 1 y 2

PbSn60 (50°C) P=0,07MPa

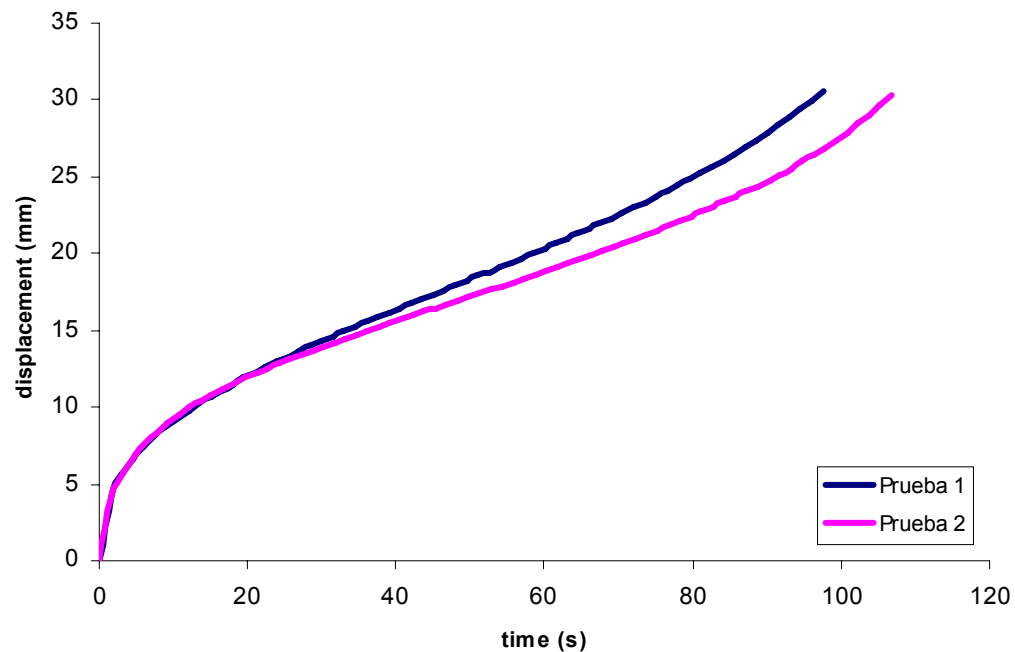


Figura 119. Ensayo PbSn60 (50°C) a P=0,07MPa. Pruebas 1 y 2



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.1 *Análisis Experimental*

PbSn60 (50°C) P=0,08MPa

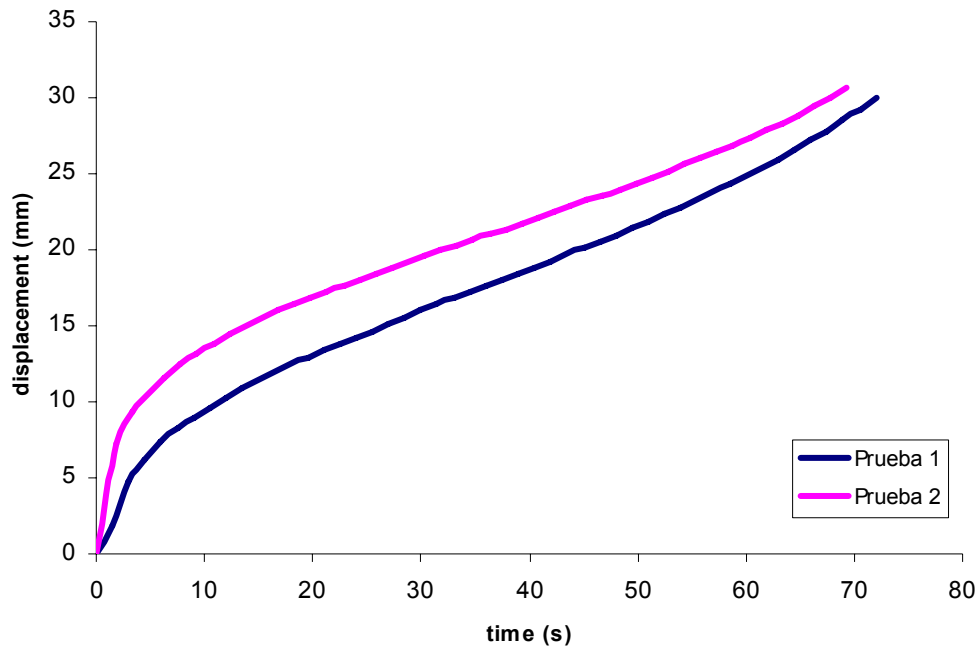


Figura 120. Ensayo PbSn60 (50°C) a P=0,08MPa. Pruebas 1 y 2

PbSn60 (50°C) P=0,09MPa

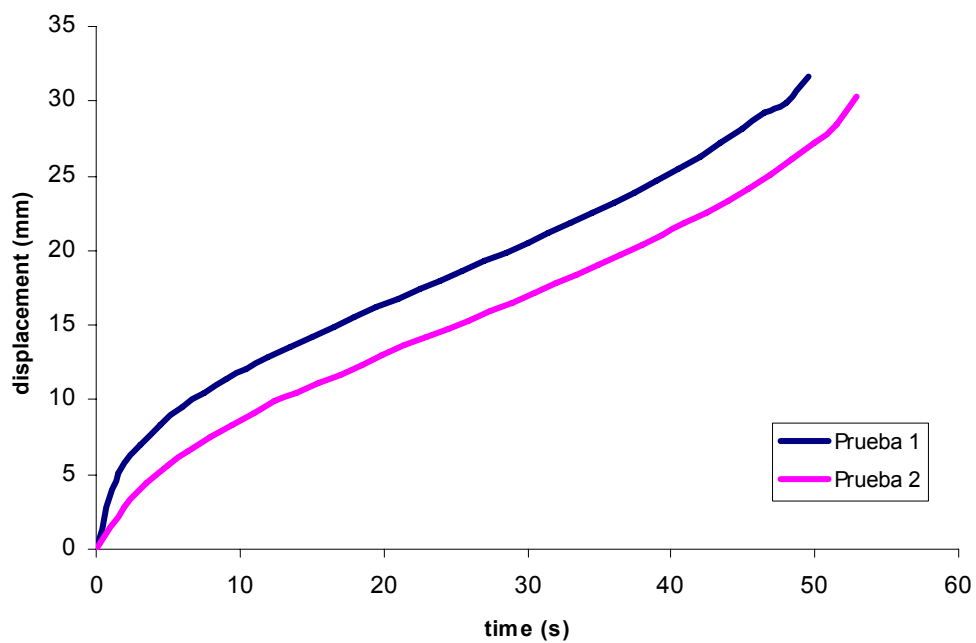


Figura 121. Ensayo PbSn60 (50°C) a P=0,09MPa. Pruebas 1 y 2



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.1 *Análisis Experimental*

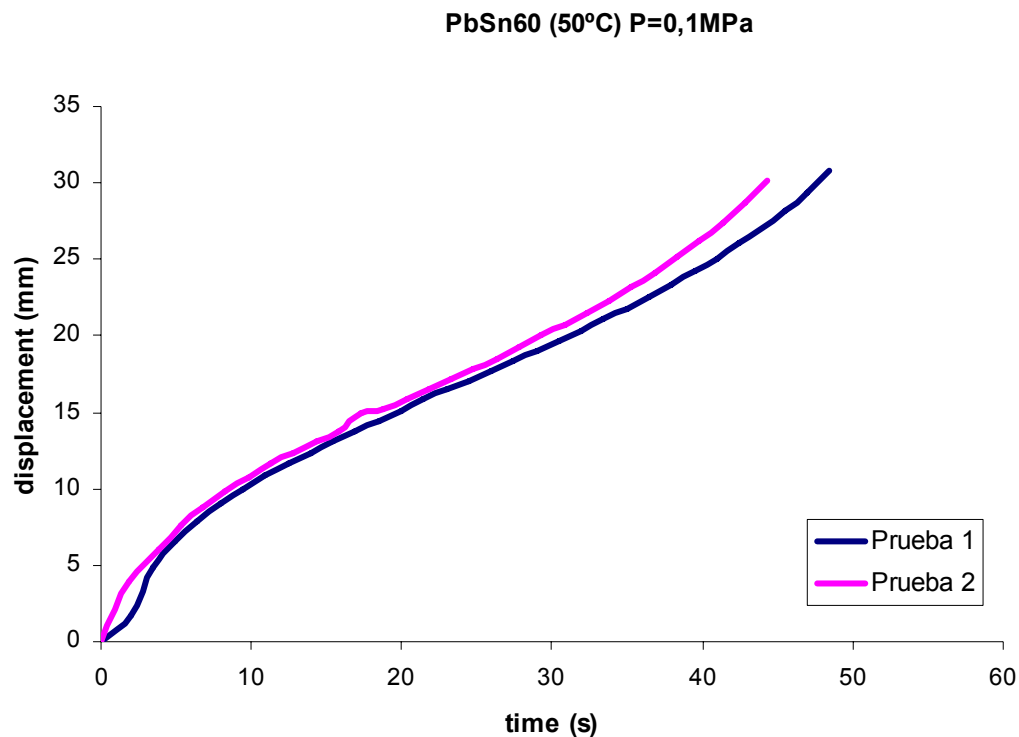


Figura 122. Ensayo PbSn60 (50°C) a P=0,1MPa. Pruebas 1 y 2

En las gráficas anteriores, en el eje de las abscisas se representa la variable independiente de este proceso, el tiempo, medido en segundos. En el eje de las ordenadas aparece el valor de la altura de la probeta, expresado en milímetros.

Como se puede observar, de la representación asumimos que los ensayos experimentales arrojan resultados consistentes, ya que para una misma presión, las curvas para la prueba 1 y 2 evolucionan de manera muy similar.

A continuación se resumen los valores de los tiempos de conformado en la siguiente tabla:



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.1 Análisis Experimental

		Tiempo (s)	h (mm)
P=0,06MPa	Prueba 1	125,996	30,188
	Prueba 2	123,329	30,035
P=0,07MPa	Prueba 1	97,501	30,612
	Prueba 2	106,732	30,296
P=0,08MPa	Prueba 1	71,995	30,020
	Prueba 2	69,329	30,623
P=0,09MPa	Prueba 1	49,499	30,663
	Prueba 2	52,949	30,266
P=0,1MPa	Prueba 1	48,449	30,780
	Prueba 2	44,306	30,203

Tabla 7. Resumen resultados Experimentales

Para cada presión, con el fin de obtener una curva representativa de las pruebas experimentales, se ha diseñado una curva de ajuste. Esta curva es una aproximación bastante exacta de los resultados obtenidos, que nos permitirá contrastar más adelante dichos valores con los que obtendremos a través de la simulación numérica. En la **Figura 123** se muestran las diferentes curvas de ajuste para cada una de las presiones ensayadas.

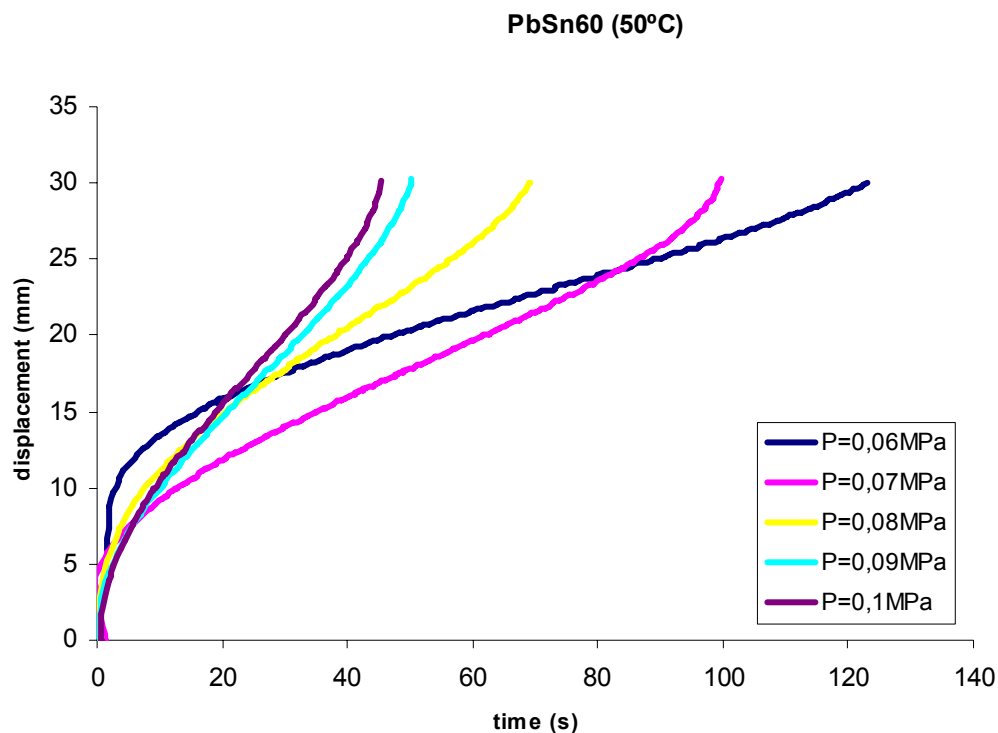


Figura 123. Curvas de ajuste resultados experimentales



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.1 *Análisis Experimental*

Se observa que a medida que las presiones son mayores, disminuyen los tiempos de conformado de la lámina.

Concretamente, la prueba que requiere un tiempo de conformado mayor es la que corresponde a la presión menor, la de 0,06 Mpa, alcanzándose los 125 segundos. Para presión igual a 0,1 MPa, el tiempo para el cual la lámina alcanza la altura de 30 mm. es de 48 segundos.

Todos los ensayos se han llevado a cabo hasta la rotura de la lámina, extrayéndose los datos correspondientes del proceso de conformado hasta el valor de altura $h=30\text{mm}$, punto en el cual la altura h se iguala al valor de a (radio de la esfera).

En relación al parámetro h se ha calculado la magnitud H . En el análisis de la caracterización mecánica de la aleación superplástica PbSn60 se hace referencia a este parámetro H , que es igual a la relación h/a , la cual en este caso, alcanza la unidad cuando h adquiere el valor de 30 mm.

Según el desarrollo explicado en el apartado anterior (caracterización mecánica de la aleación PbSn60), se han calculado los valores de K y m .

	PbSn60
m	0,364
K	36,925

Tabla 8. Valores de K y m del material PbSn60 a $T=50^\circ\text{C}$



7.2 ANÁLISIS NUMÉRICO

En este apartado se va a realizar un estudio de los ensayos experimentales a través de un software de Análisis de Elementos Finitos, MARC Mentat. Se llevarán a cabo las simulaciones numéricas de dichas pruebas con el fin de poder contrastar los resultados experimentales con un modelo numérico.

Estas simulaciones pueden realizarse gracias a la obtención experimental de los parámetros que caracterizan las propiedades del material, los valores de K y n .

En este estudio se ha analizado el proceso de SPF al que se ha sometido una lámina de la aleación superplástica PbSn60. Dicha lámina circular, de diámetro 64 mm, se apoya sobre un molde, y sobre ella actúa una presión constante que la deforma hasta alcanzar la geometría de una semiesfera. El objetivo de este proceso es alcanzar deformaciones del orden del radio inicial, 30 mm. Los resultados que se pretenden obtener son el desplazamiento del punto central de la lámina (el punto más crítico) a lo largo del tiempo, así como otras variables, tales como la deformación, velocidad de deformación y valor de tensión. Todas estas variables nos ayudarán a describir el comportamiento mecánico de dicha aleación superplástica.

Descripción

En este problema tenemos dos cuerpos en contacto:

- Un cuerpo rígido: el molde sobre el que se apoya la lámina
- Un cuerpo deformable: la lámina de PbSn60 de espesor igual a 0,3mm.

La pieza de trabajo tiene una serie de condiciones de contorno que son las siguientes:

- Los nodos que se encuentran en el eje de simetría y en el borde externo de la lámina tienen restringidos los desplazamientos radiales.
- El nodo más externo en contacto con el molde tiene restringido, además del desplazamiento radial, el desplazamiento vertical. De esta manera, la lámina queda anclada en ese punto al molde durante todo el proceso.

- La presión del gas se simula a través de una carga por unidad de longitud a lo largo de toda la cara externa de la lámina. Asignaremos la presión para cada ensayo a través de una subrutina (FORCEM) en un archivo Fortran, de donde el programa leerá dicho valor. Más adelante se explicará esta subrutina.

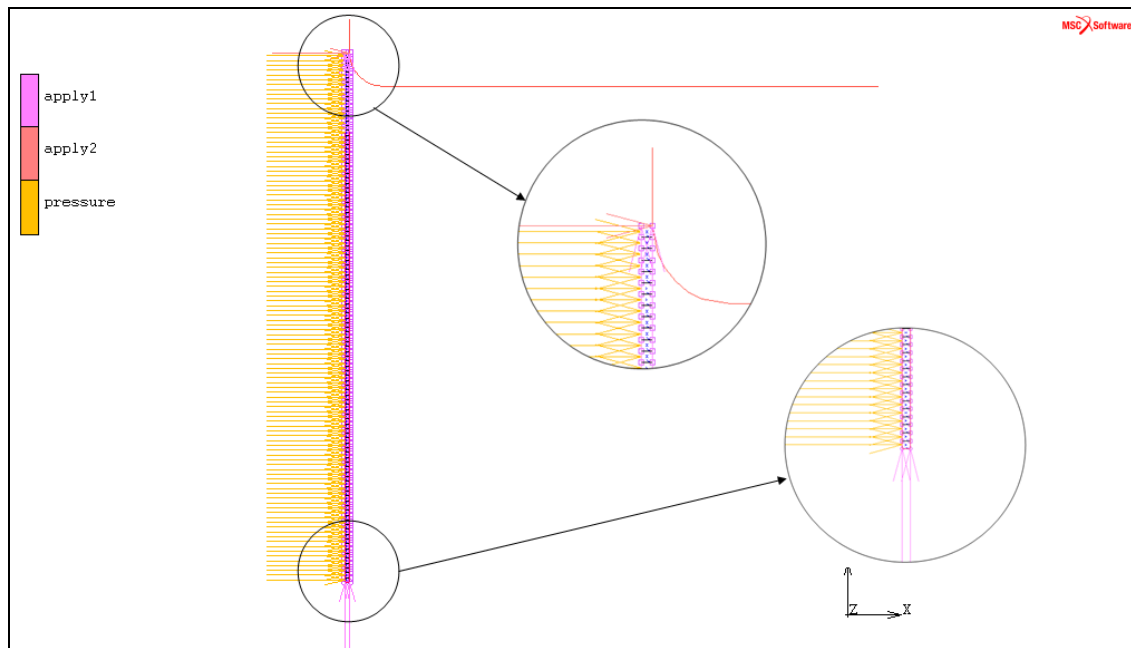


Figura 124. Condiciones de contorno

El proceso simulado se asemeja a un proceso de conformado mecánico libre, por lo que no se ha diseñado un molde superior.

Idealización del proceso

Debido a la naturaleza simétrica de la geometría y de las cargas, este proceso puede ser idealizado como un modelo axialsimétrico. El borde de la lámina de trabajo está anclado de tal manera que evita los desplazamientos como sólido rígido de la lámina durante el análisis. El molde sobre el que reposa la lámina se proyecta como un sólido rígido que permanece inmóvil durante el análisis. Debido a la acción del gas a presión, la lámina se va deformando hasta alcanzar la configuración $h=a=30$ mm (del nodo en estudio), instante en el cual termina nuestro análisis.

Requerimientos para un análisis de éxito

Se considera que el análisis ha tenido éxito cuando el nodo en estudio alcanza un desplazamiento igual a 30 mm. Para ello se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los desplazamientos del nodo durante el proceso de conformado entre un incremento y el sucesivo deben ser del orden del espesor de la lámina.
- Código de salida (Exit Number) del software igual a 3004. Este número indica que el análisis ha sido correcto.

Planteamiento del problema

La lámina es una aleación superplástica de PbSn60, cuyas características quedan definidas por los parámetros K y m, obtenidos de las pruebas experimentales. Más adelante se explicará como se dan estos datos de entrada al programa.

La geometría del problema es la siguiente:

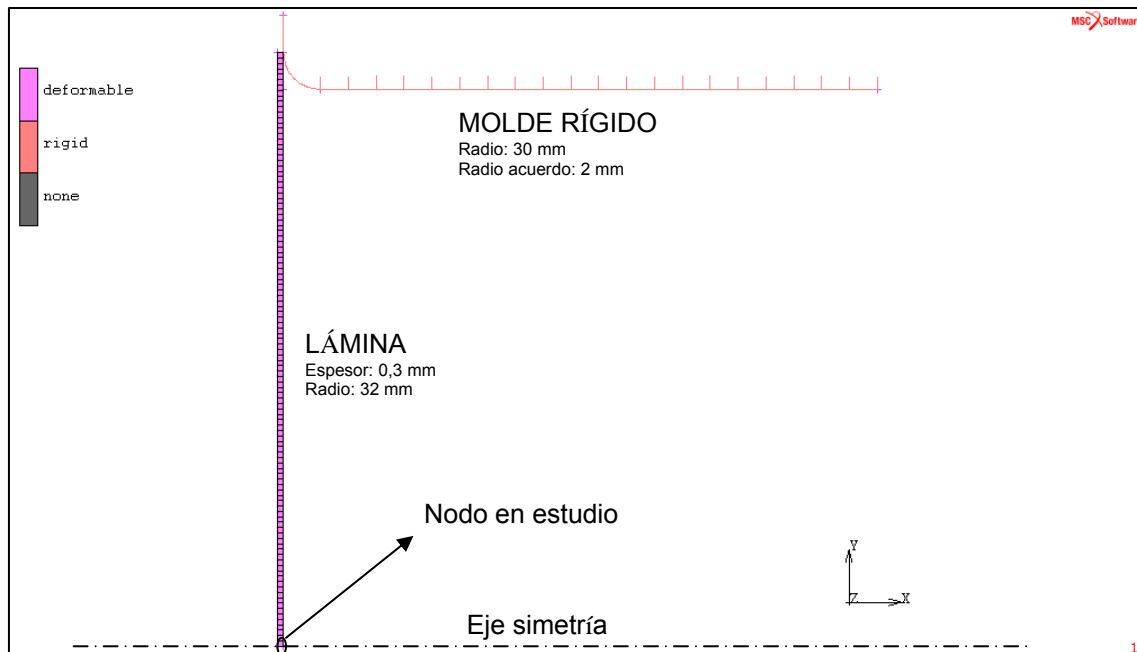


Figura 125. Geometría del problema

La lámina se considera como cuerpo deformable, mientras que el molde se supone como cuerpo rígido durante todo el análisis.

Pasos generales en el desarrollo del análisis

Paso 1: Creación del modelo y curvas necesarias para el molde

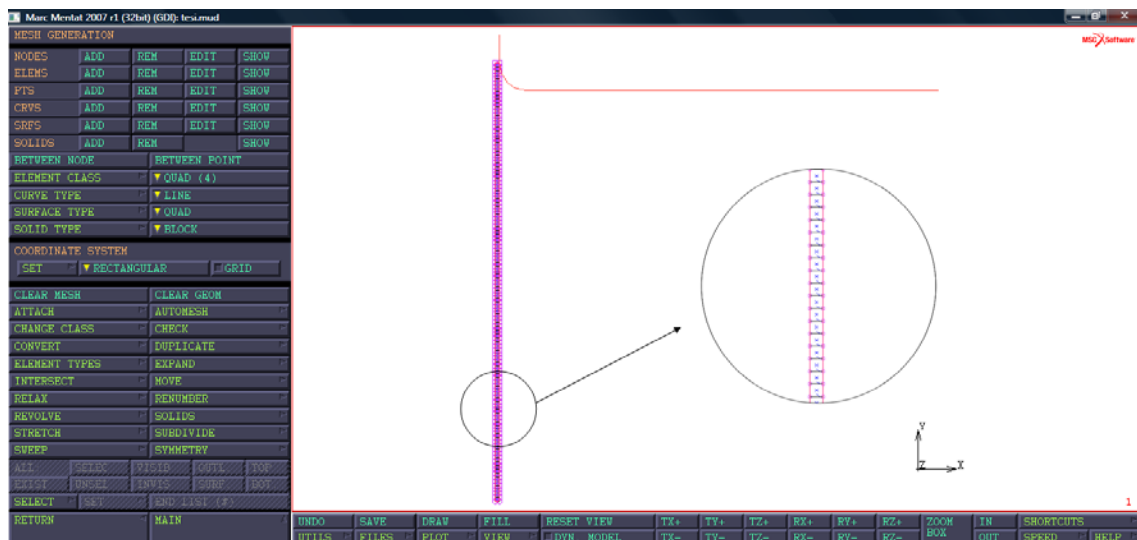


Figura 126. Geometría del problema

Para el análisis de la lámina se ha efectuado un mallado con elementos cuadrados.

Paso 2 Aplicar las condiciones de contorno y fijar los desplazamientos en los nodos. Introducción de las propiedades del material.

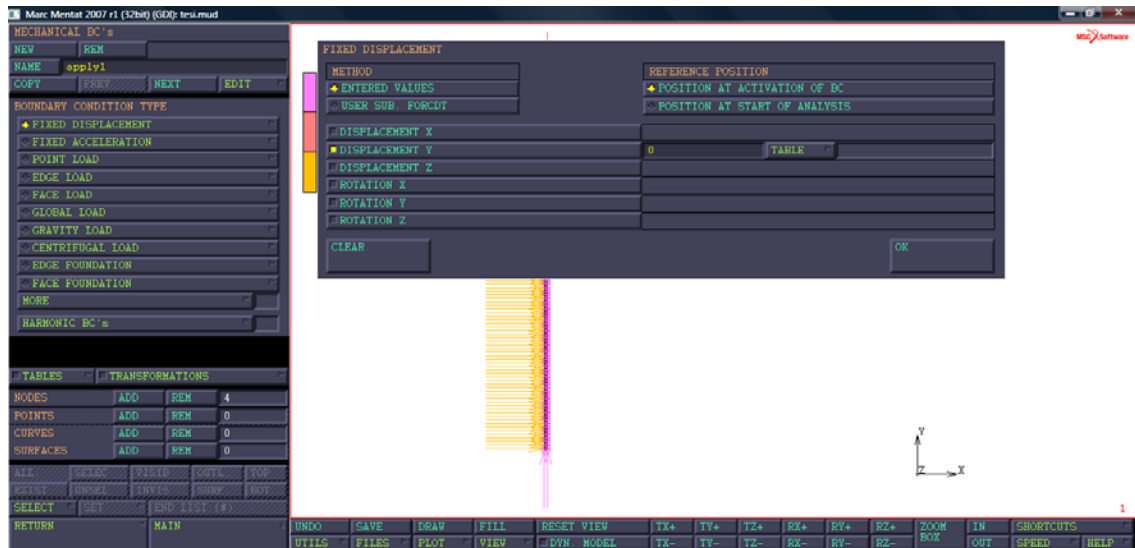


Figura 127. Fijación de los desplazamientos de los nodos

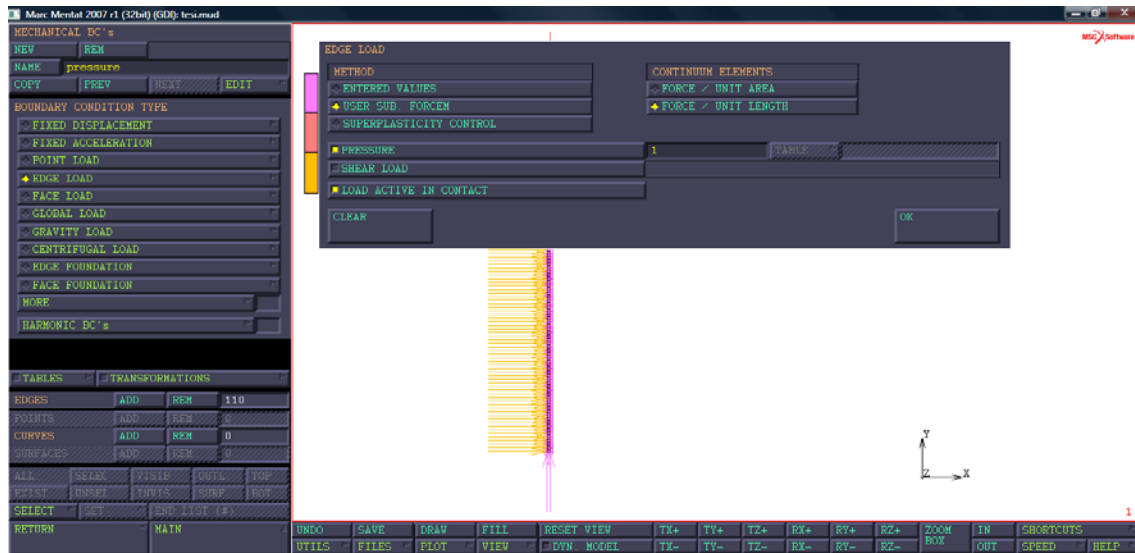


Figura 128. Aplicación de cargas (USER SUB FORCEM)



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.2 Análisis Numérico

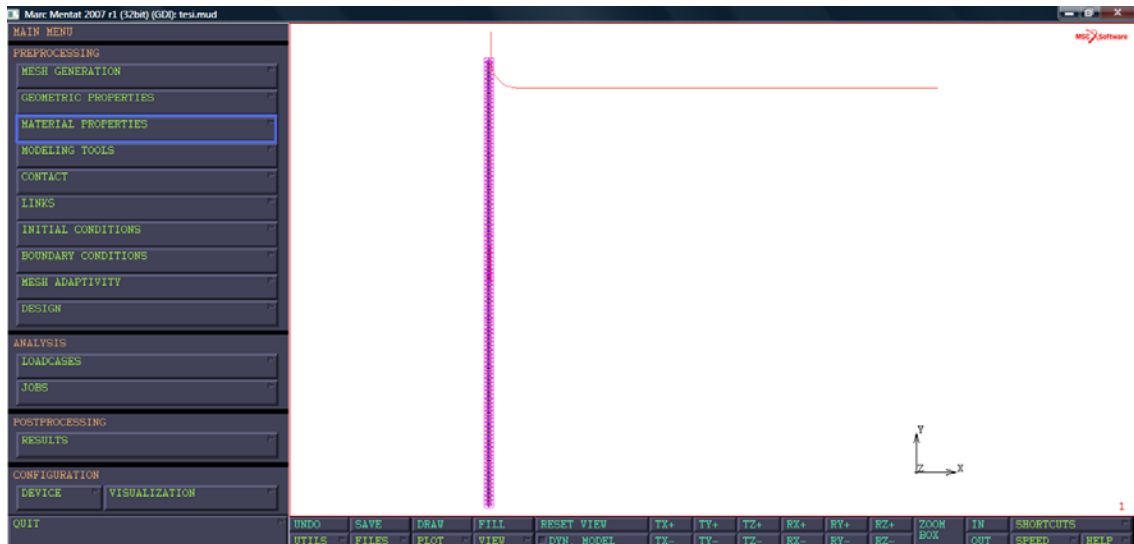


Figura 129. Propiedades del material

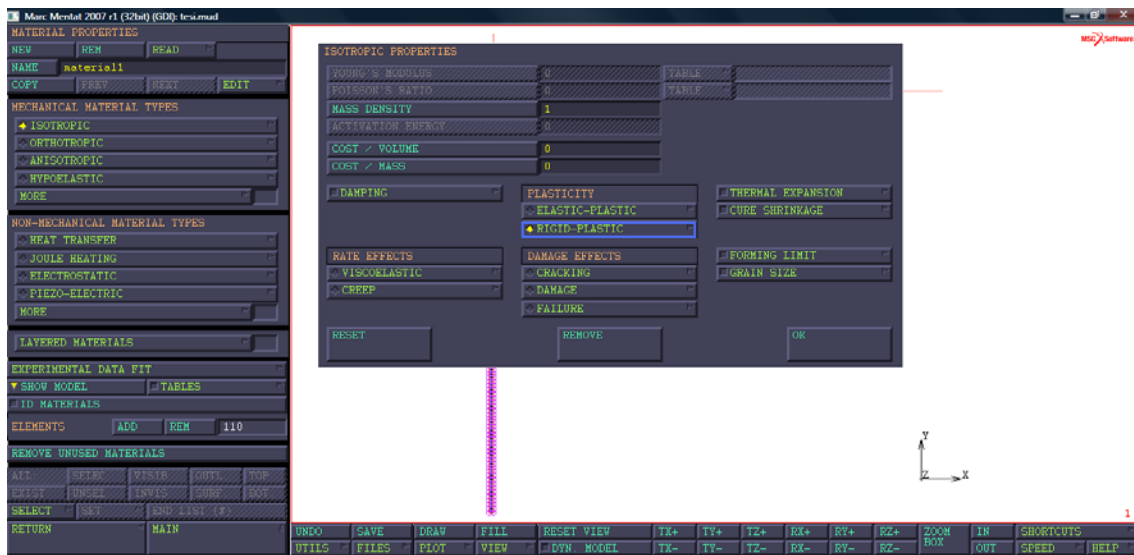


Figura 130. Material rígido-plástico

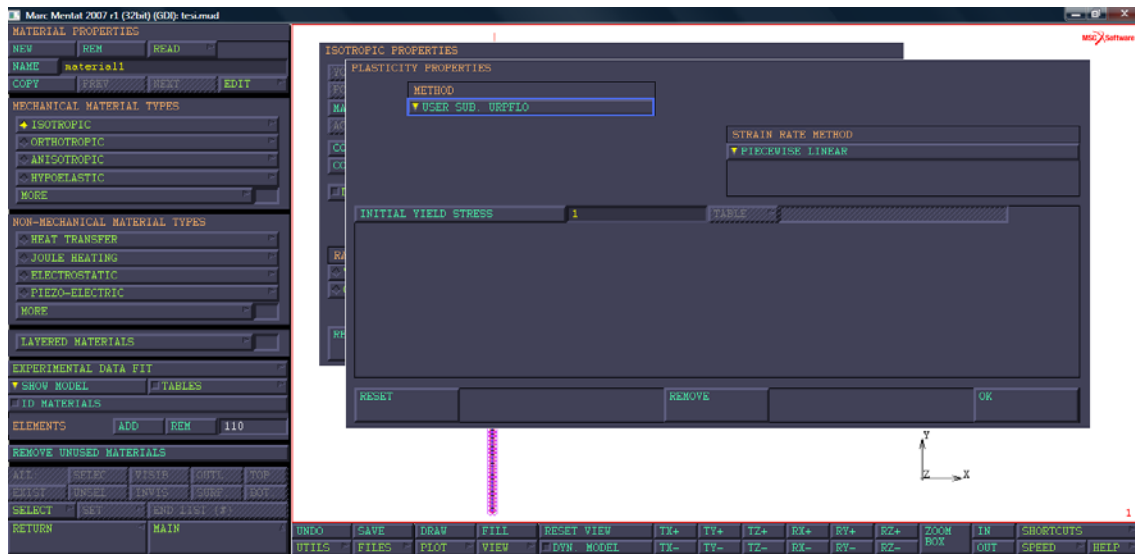


Figura 131. Subrutina URPFLO

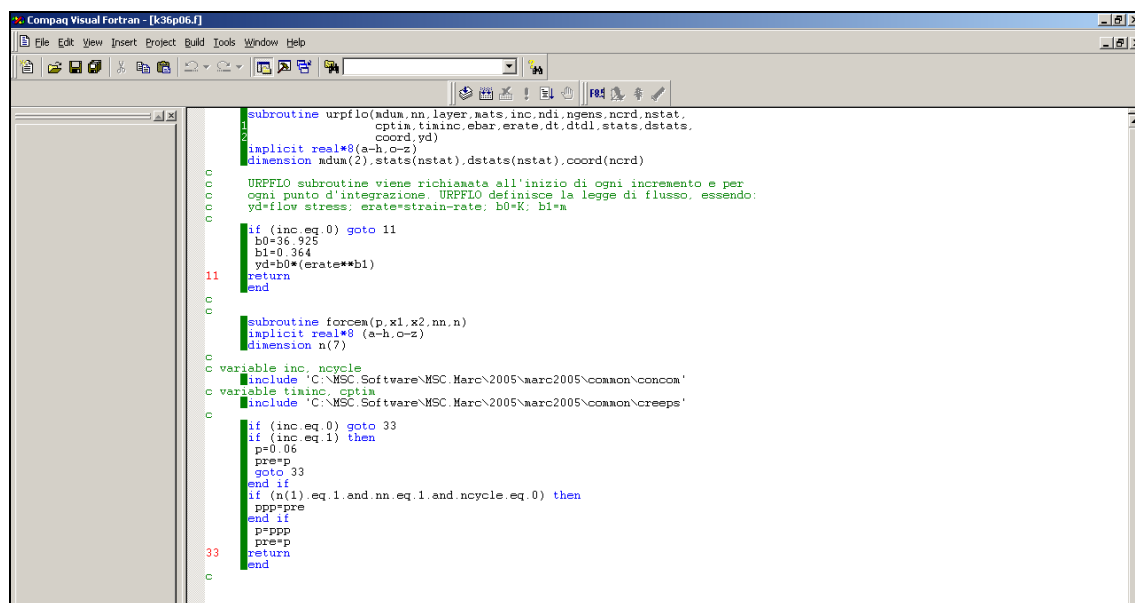


Figura 132. Archivo Fortran

En este paso hemos aplicado las condiciones de contorno que hemos especificado en la descripción del problema. Se ha introducido un valor de presión 1 y se ha seleccionado la opción del menú desplegable USER SUB FORCEM (ver **Figura 128**). De esta manera, el programa tomará el valor de la presión de dicha subrutina. A continuación, se han introducido las propiedades del material rígido plástico con el que estamos trabajando. Para ello, se le da un valor de límite elástico unitario, seleccionando la opción subrutina URPFLO en el menú desplegable (ver **Figura 131**).

Así, el programa entiende que debe ir a leer dicha subrutina para encontrar las propiedades del material.

Estas dos subrutinas se encuentran en el archivo Fortran mostrado en la **Figura 132**. En éste, se encuentran ambas subrutinas, la URPFLO para definir las propiedades del material y obtener la tensión de flujo, y la FORCEM, que sirve para introducir la presión aplicada sobre la lámina.

Paso 3: Identificación de los contactos entre cuerpos.

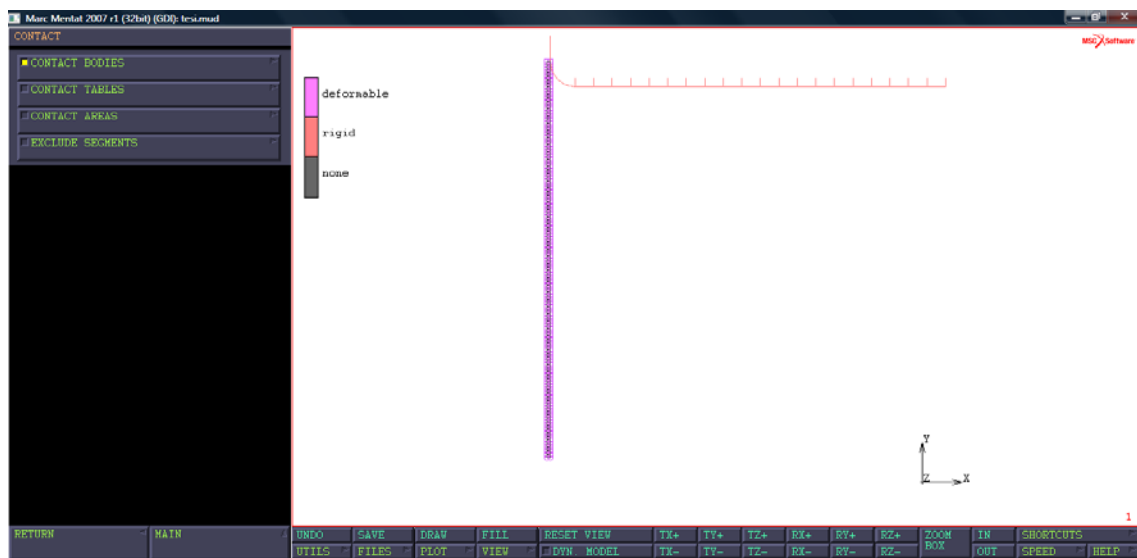


Figura 133. Cuerpos en contacto

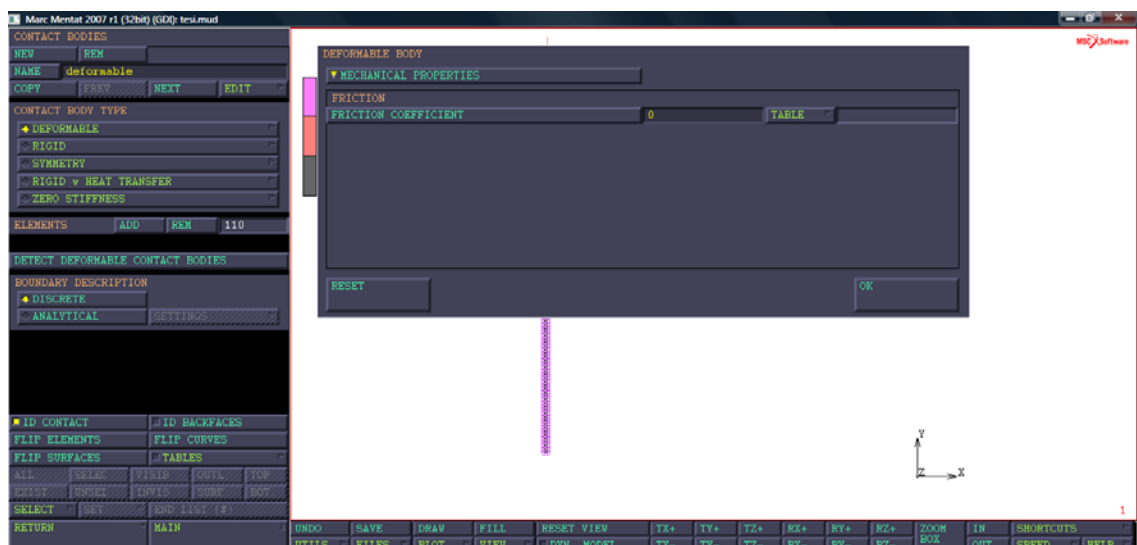


Figura 134. Cuerpo deformable. Coeficiente de fricción nulo entre cuerpos



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.2 Análisis Numérico

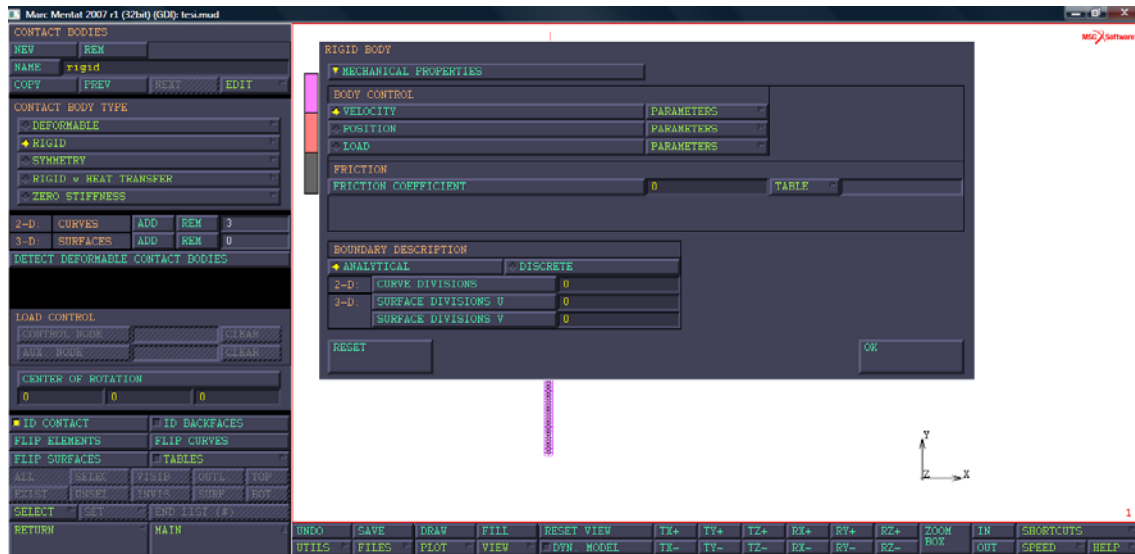


Figura 135. Cuerpo rígido. Coeficiente de fricción nulo entre cuerpos

En este paso debemos definir los cuerpos que componen el problema. Se han de definir siempre primero los cuerpos deformables. Debe verificarse que las líneas que definen a que lado del contorno se encuentra el cuerpo rígido, queden en el lado contrario al cuerpo deformable.

Paso 4: Definir las propiedades geométricas del material

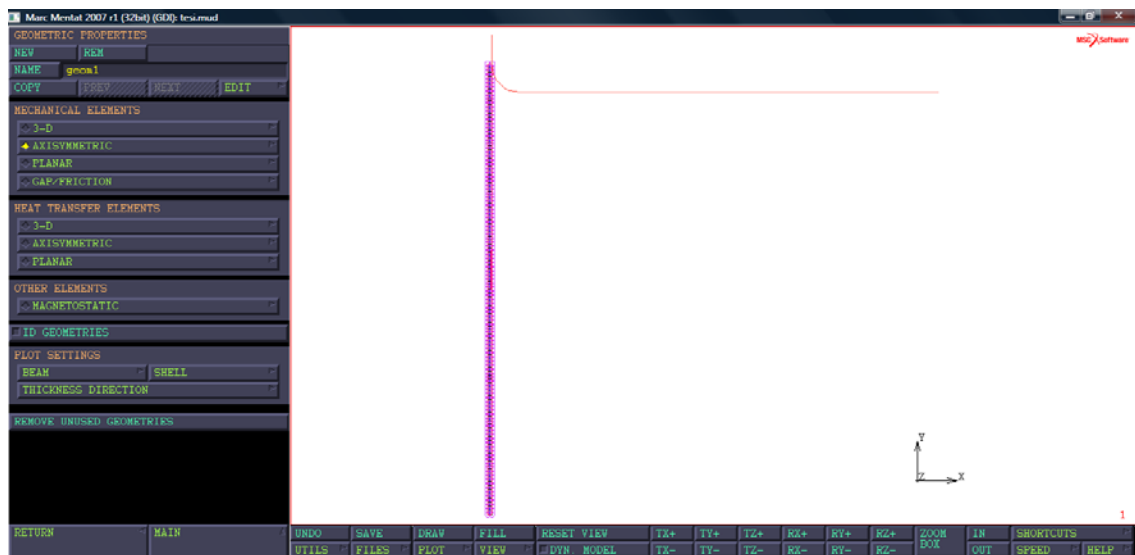


Figura 136. Propiedades geométricas. Sólido axialsimétrico



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.2 Análisis Numérico

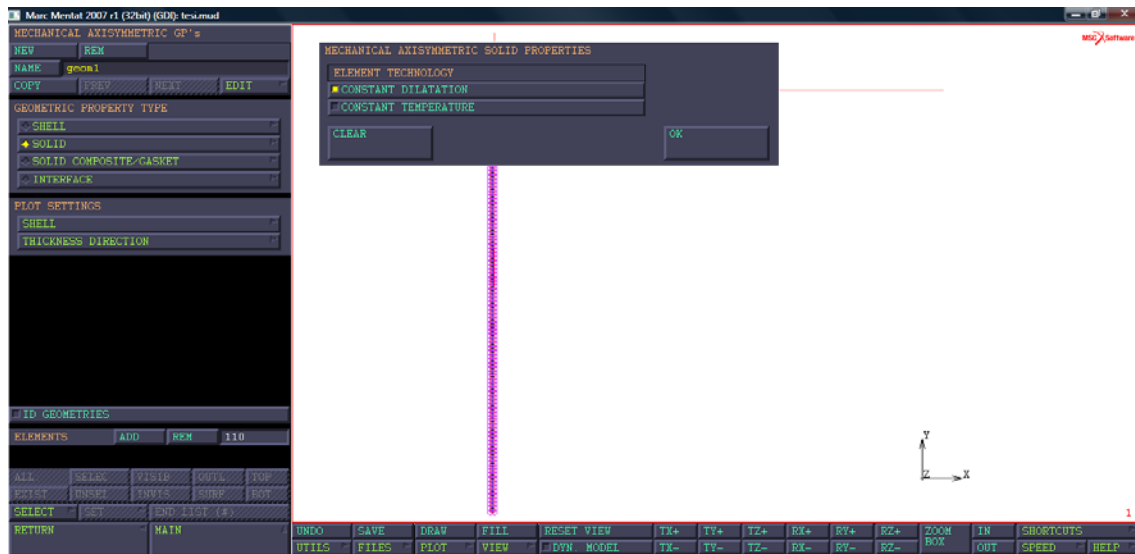


Figura 137. Propiedades geométricas. Dilatación constante

En este tipo de análisis, para materiales rígido plásticos se asume la hipótesis de material incompresible. La forma de describir dicha característica es darle a nuestro material una dilatación constante durante todo el proceso de conformado.

Paso 5: Activar los parámetros para grandes deformaciones y seleccionar las variables que queremos analizar.

Una vez definidos todos los parámetros correspondientes al bloque de definición, pasamos al bloque de análisis. Aquí, en el apartado Jobs, seleccionamos la condición de grandes deformaciones y los resultados que queremos interpretar posteriormente para poder lanzar el caso.



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.2 Análisis Numérico

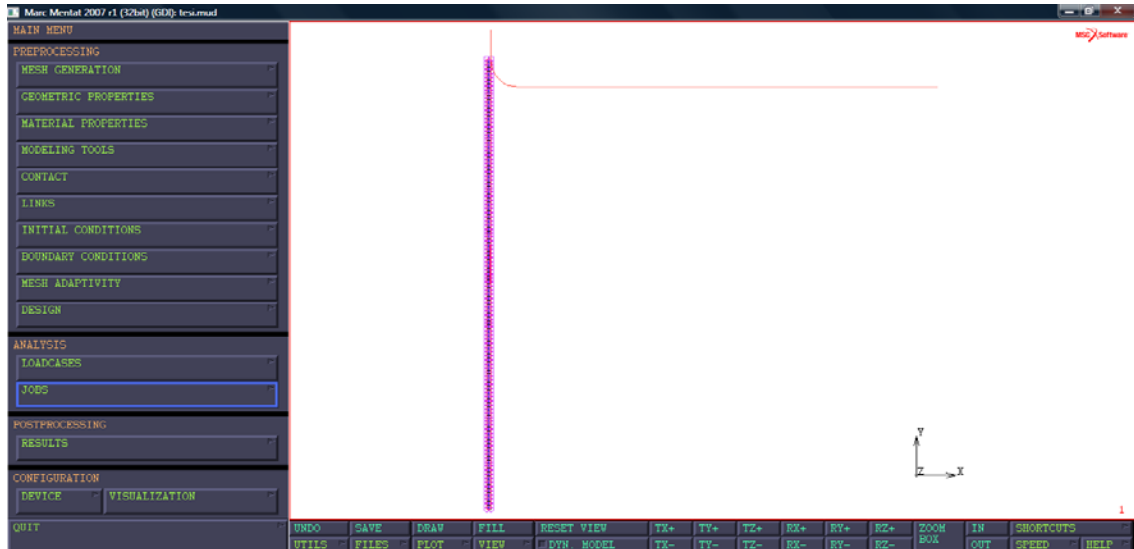


Figura 138. Jobs

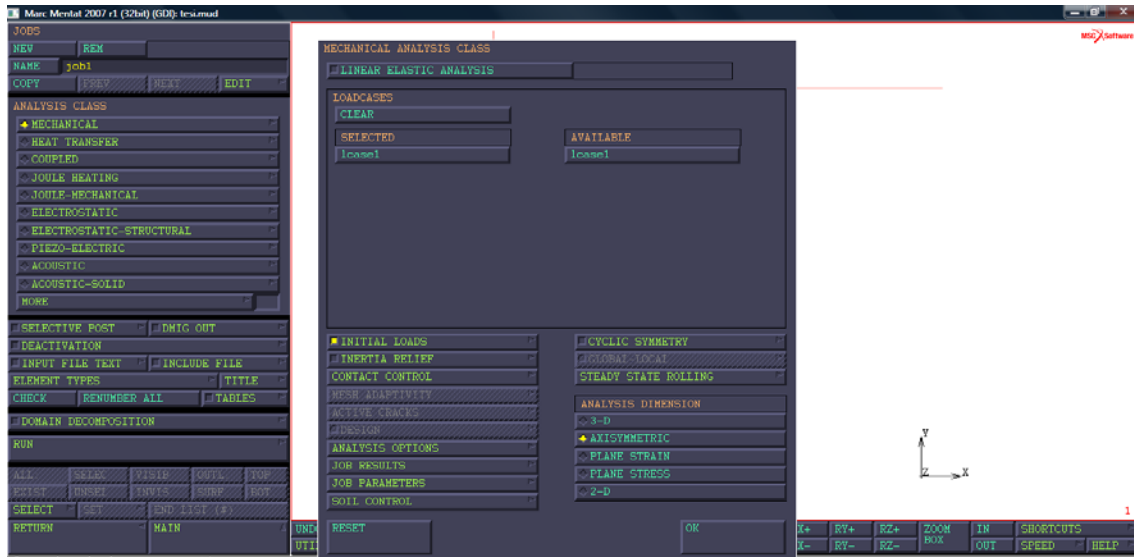


Figura 139. Análisis Mecánico



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.2 Análisis Numérico

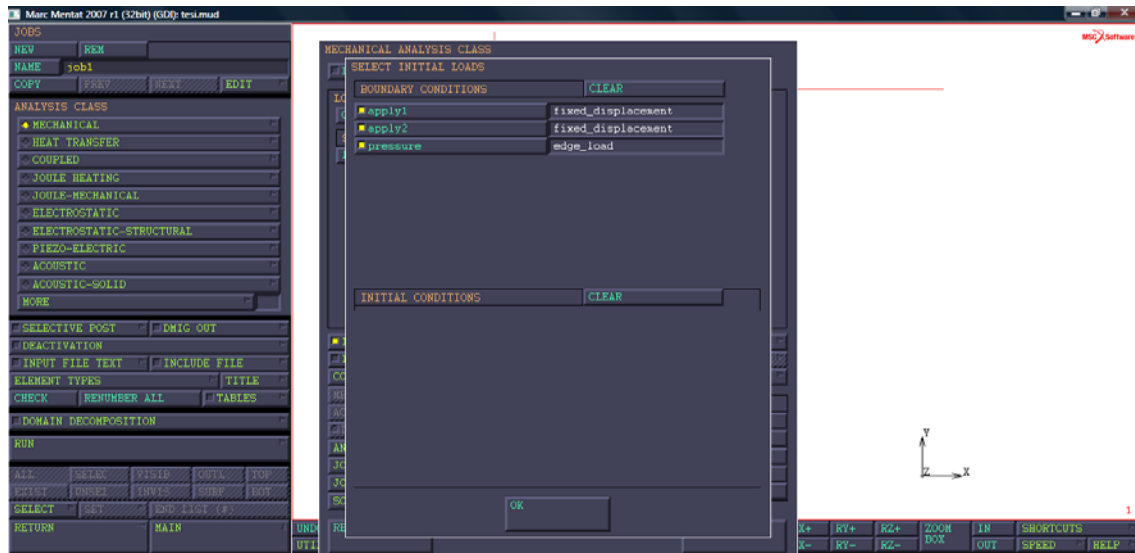


Figura 140. Selección de las condiciones de contorno

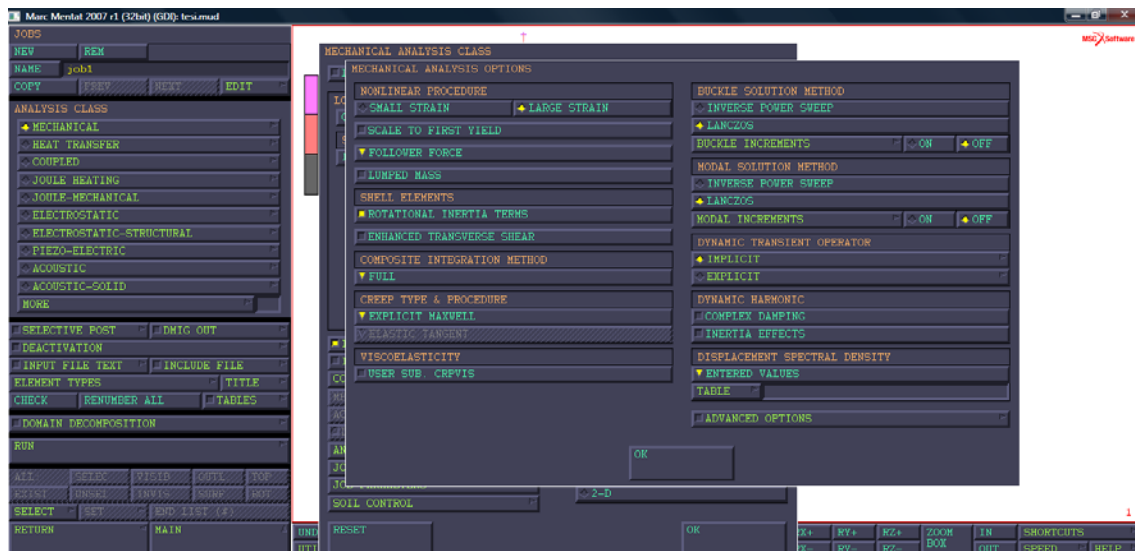


Figura 141. Opciones del análisis mecánico



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.2 Análisis Numérico

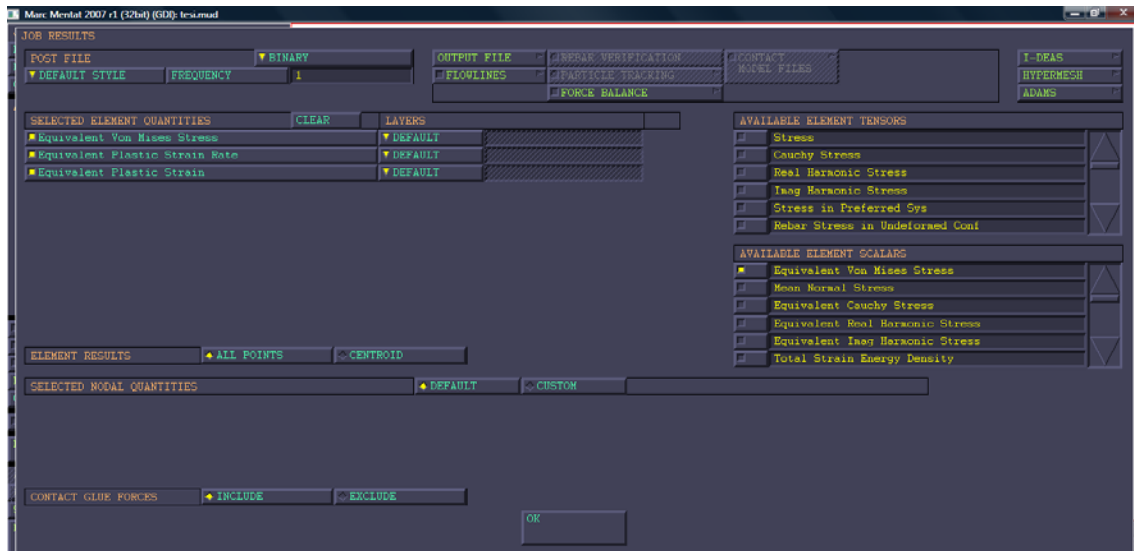


Figura 142. Selección variables de salida

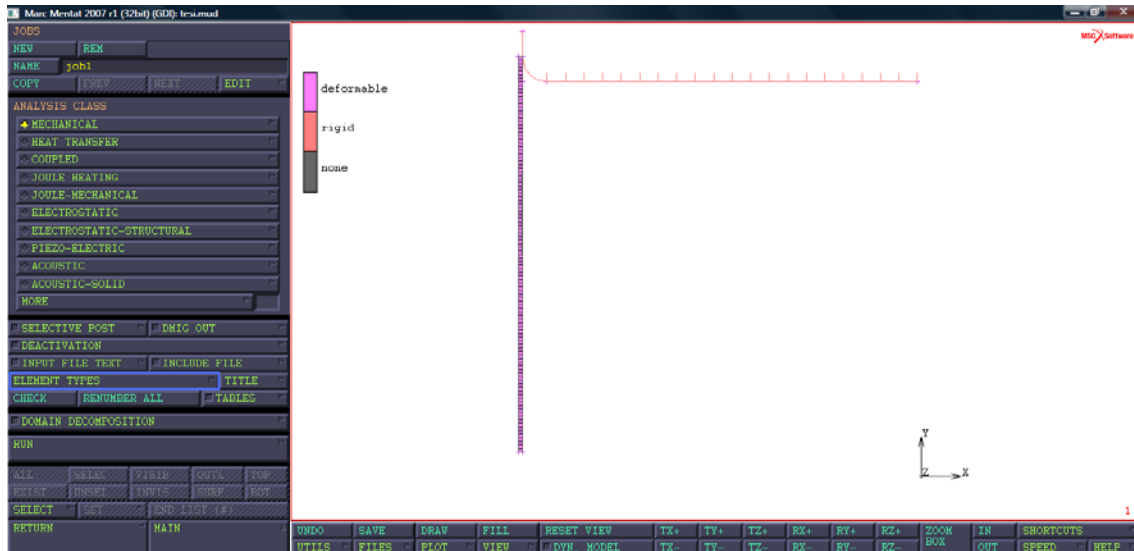


Figura 143. Jobs. Tipo de elemento

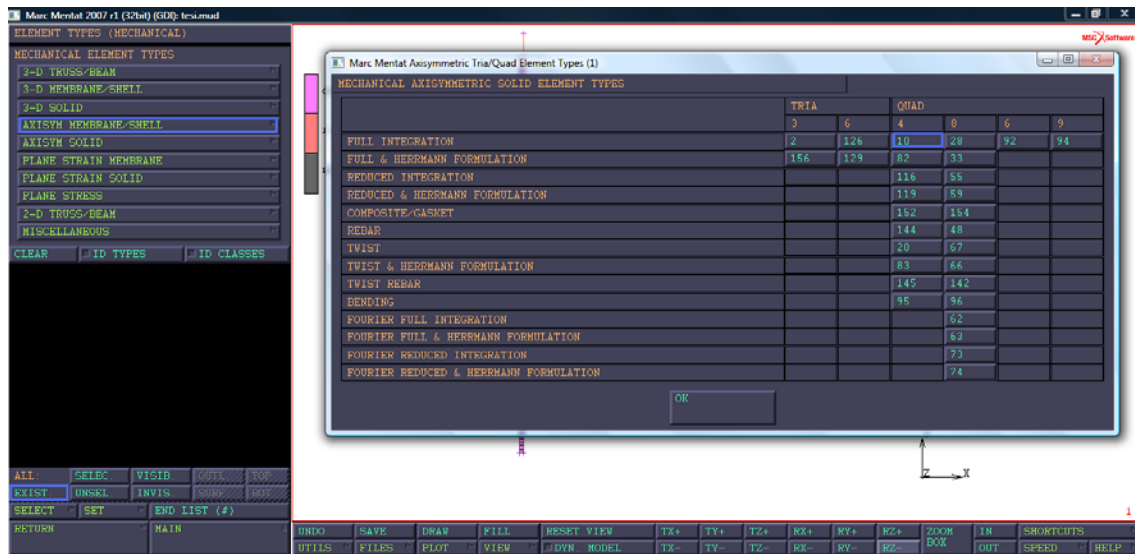


Figura 144. Jobs. Elemento tipo 10

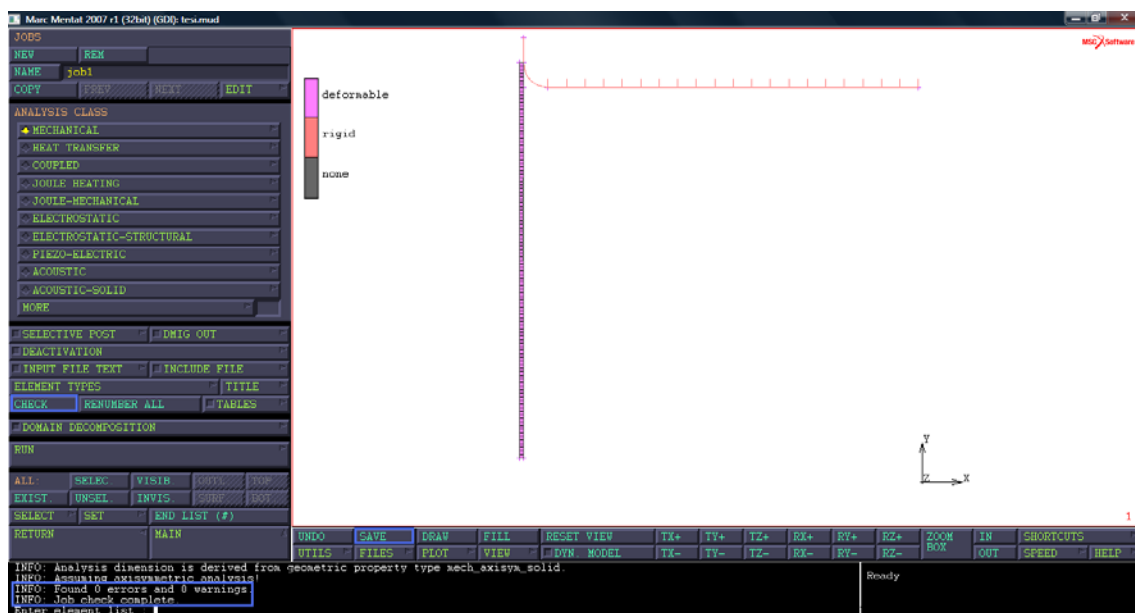


Figura 145. Comprobación errores (check)

Antes de lanzar la simulación se ha de seleccionar el tipo de elemento. Éste es el elemento tipo 10, el cual lo encontramos en la librería del programa como un elemento de tipo quad, elemento plano de cuatro nodos. Por último, antes de salvar el file, se realiza un check de errores, para comprobar posibles incoherencias.

Paso 6: Lanzar la simulación.

En este caso lanzaremos la simulación de manera externa. Para ello necesitamos grabar un archivo .dat. En él, todas las propiedades del problema quedan definidas, y nos permitirá modificar manualmente el número de incrementos y el time step de cada uno de ellos. Más adelante se mostrará como está construido dicho archivo y cual es su función.

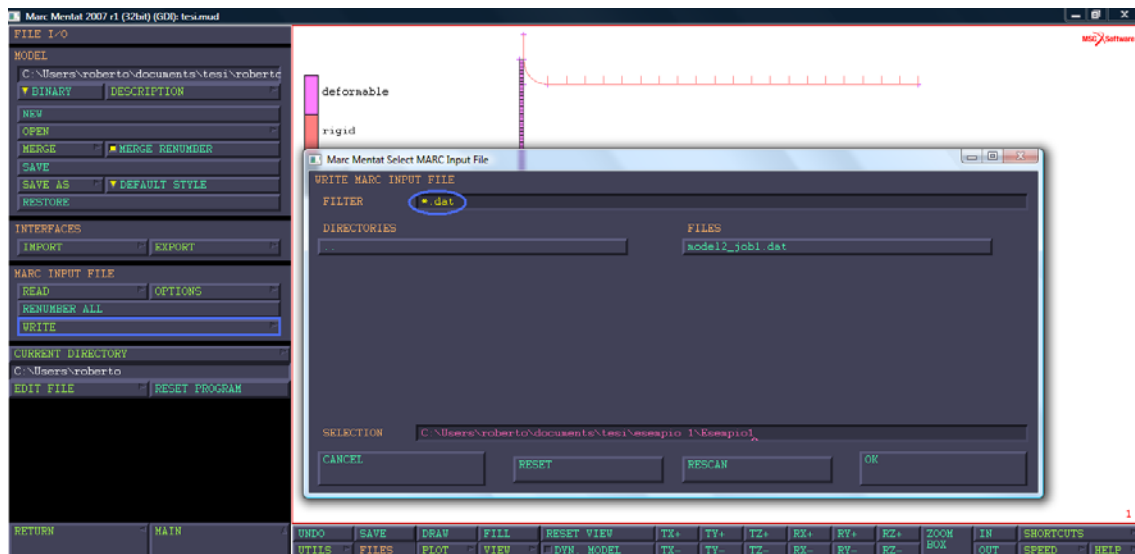


Figura 146. Grabar archivo .dat



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.2 Análisis Numérico

```
k36p06 - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda

title job1
$...MARC input file produced by MSC.Marc Mentat 2005 (32bit)
$.....
$...input file using extended precision
extended
$.....
sizing 1000000 110 222 5
elements 10
version 11
processor 1 1 1
$no list
large disp
update 0 0
finite
constant d
follow for 1 0 0
all points
no echo 1 2 3
dist loads 1 110 0
setname 3
end
$.....
solver 8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
optimize 11
connectivity
0 0 1
1 10 1
2 10 3
3 10 5
Nº de elemento . . . . .
108 10 215 216 218 217
109 10 217 218 220 219
110 10 219 220 222 221
coordinates
3 222 0 1
1-3.0000000000000000-1 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0
2 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0
3-3.0000000000000000-1 2.909090909090910-1 0.0000000000000000+0
. . .
220 0.0000000000000000+0 3.170909090909091+1 0.0000000000000000+0
221-3.0000000000000000-1 3.2000000000000000+1 0.0000000000000000+0
222 0.0000000000000000+0 3.2000000000000000+1 0.0000000000000000+0
define node 2 221 set apply1_nodes
define 1 node 221 set apply2_nodes
define 222 edgemt to set 110:3 pressure_edges
isotropic
1rigid isotropic 0 0 0 0material11
0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 1.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 1.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0
1 to 110
$...user subroutine urpflo has been flagged
geometry
0.0000000000000000+0 1.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0
1 to 110
fixed disp
0.0000000000000000+0
2
1 2 221 222
0.0000000000000000+0
1
222
dist loads
11 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 3
1 to 110
contact
2 0 222 0 0 9999 3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
1.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 9.500000000000000-1 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0
$...contact body 1: deformable
1 0 0 0 0 0 0 2deformable
0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 1.0000000000000000+0
0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0
0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0
1 to 110
$...contact body 2: rigid
2 3 0 0 1 0 0 1rigid
0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 1.0000000000000000+0
0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0
0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0 0.0000000000000000+0
9 2 1
0.0000000000000000+0 3.4000000000000000+1
0.0000000000000000+0 3.2000000000000000+1
1.0000000000000000+0
1.0000000000000000+0
0.0000000000000000+0
0.0000000000000000+0
1.0000000000000000+0
1.0000000000000000+0
```




7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.2 Análisis Numérico

```

      9      3      3      12
0.000000000000000+0 3.200000000000000+1
0.000000000000000+0 3.000000000000000+1
2.000000000000000+0 3.000000000000000+1
1.000000000000000+0
7.071067811865476-1
1.000000000000000+0
0.000000000000000+0
0.000000000000000+0
0.000000000000000+0
1.000000000000000+0
1.000000000000000+0
1.000000000000000+0
      9      2      2      1
2.000000000000000+0 3.000000000000000+1
3.200000000000000+1 3.000000000000000+1
1.000000000000000+0
1.000000000000000+0
0.000000000000000+0
0.000000000000000+0
0.000000000000000+0
1.000000000000000+0
1.000000000000000+0
1.000000000000000+0
no print
post
      3      16      17      0      0      19      20      0      1      0      0      0      0      0      0
17      0
27      0
28      0
parameters
1.000000000000000+0 1.000000000000000+9 1.000000000000000+2 1.000000000000000+6 2.500000000000000-1 5.000000000000000-1 1.500000000000000+0-5.000000000000000-1
8.625000000000000+0 2.000000000000000+1 1.000000000000000-4 1.000000000000000-6 1.000000000000000+0 1.000000000000000-4
8.314000000000000+0 2.731500000000000+2 5.000000000000000-1 0.000000000000000+0 5.670510000000000-8 1.438769000000000-2 2.997900000000000+8 1.000000000000000+30
0.000000000000000+0 0.000000000000000+0
end option
$.
$.start of loadcase |case1
title |case1
control
99999 200 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 0
1.000000000000000-1 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0
parameters
1.000000000000000+0 1.000000000000000+9 1.000000000000000+2 1.000000000000000+6 2.500000000000000-1 5.000000000000000-1 1.500000000000000+0-5.000000000000000-1
8.625000000000000+0 2.000000000000000+1 1.000000000000000-4 1.000000000000000-6 1.000000000000000+0 1.000000000000000-4
8.314000000000000+0 2.731500000000000+2 5.000000000000000-1 0.000000000000000+0 5.670510000000000-8 1.438769000000000-2 2.997900000000000+8 1.000000000000000+30
0.000000000000000+0 0.000000000000000+0
auto load
10 0 10
time step
1.000000000000000-3
dist loads
0
11 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 3
1 to 110
motion change
1
2 0
0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0
continue
$.end of loadcase |case1
$.
title |case1
control
99999 200 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 1 0
1.000000000000000-1 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0
parameters
1.000000000000000+0 1.000000000000000+9 1.000000000000000+2 1.000000000000000+6 2.500000000000000-1 5.000000000000000-1 1.500000000000000+0-5.000000000000000-1
8.625000000000000+0 2.000000000000000+1 1.000000000000000-4 1.000000000000000-6 1.000000000000000+0 1.000000000000000-4
8.314000000000000+0 2.731500000000000+2 5.000000000000000-1 0.000000000000000+0 5.670510000000000-8 1.438769000000000-2 2.997900000000000+8 1.000000000000000+30
0.000000000000000+0 0.000000000000000+0
auto load
10 0 10
time step
1.000000000000000-2
dist loads
0
11 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 3
1 to 110
motion change
1
2 0
0.000000000000000+0 0.000000000000000+0 0.000000000000000+0
continue
$.end of loadcase |case1
$.

```

Figura 147. Archivo .dat

Para lanzar el caso, hacemos una llamada mediante la ventana de comandos para ejecutar los parámetros que hemos definido en el archivo .dat, sobre nuestro modelo en el archivo .mud. Se obtiene un archivo de resultados con extensión .t16. Recordar que el programa tomará las características del material del archivo de Fortran.

El criterio seguido para asignar el número de incrementos (auto load) con su respectivo time step ha sido el siguiente:

- Iniciar con un time step bajo para inicializar la simulación.
- Imponer un time step de manera que el desplazamiento para cada incremento sea del orden de la variable característica del problema, el espesor.
- No realizar más de 500 incrementos para un mismo time step.

Paso 7: Post procesado de los resultados, mostrando la estructura deformada y las variables a evaluar (desplazamiento, deformación, velocidad de deformación y tensiones residuales)

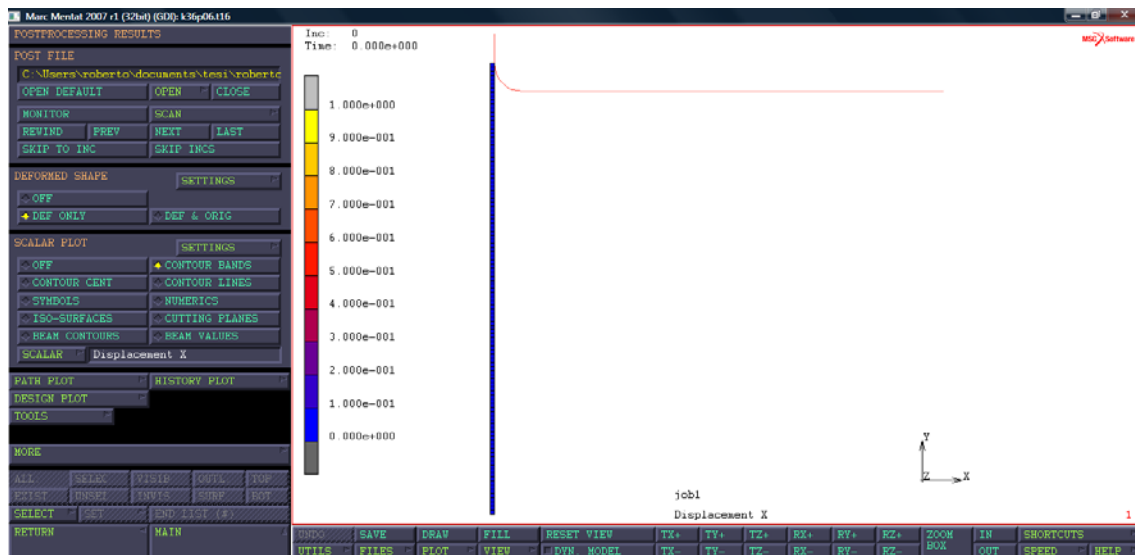


Figura 148. Archivo resultados (Post File)

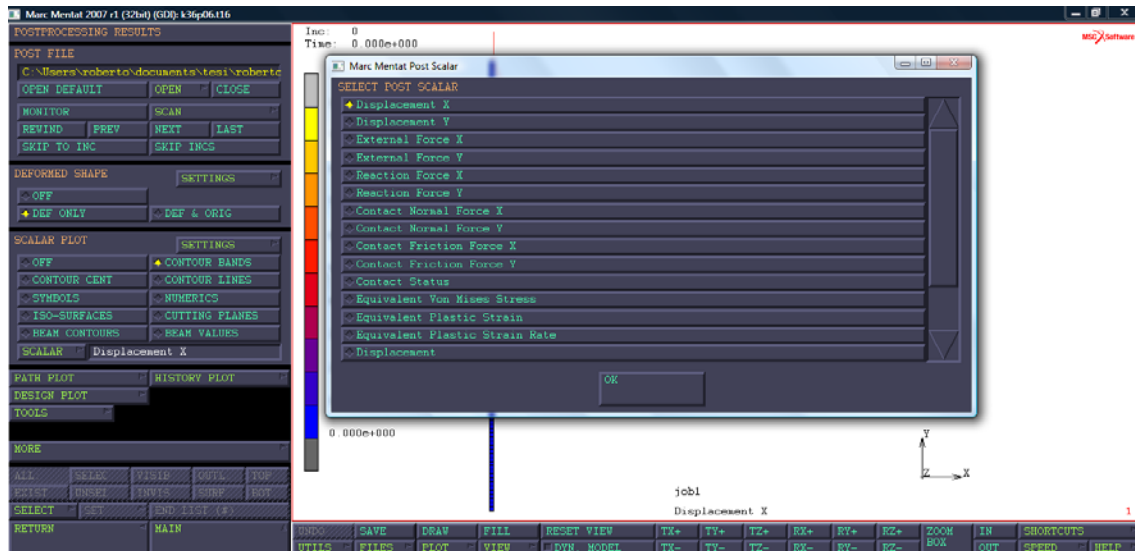


Figura. 149. Selección variable a representar: Desplazamiento Eje X

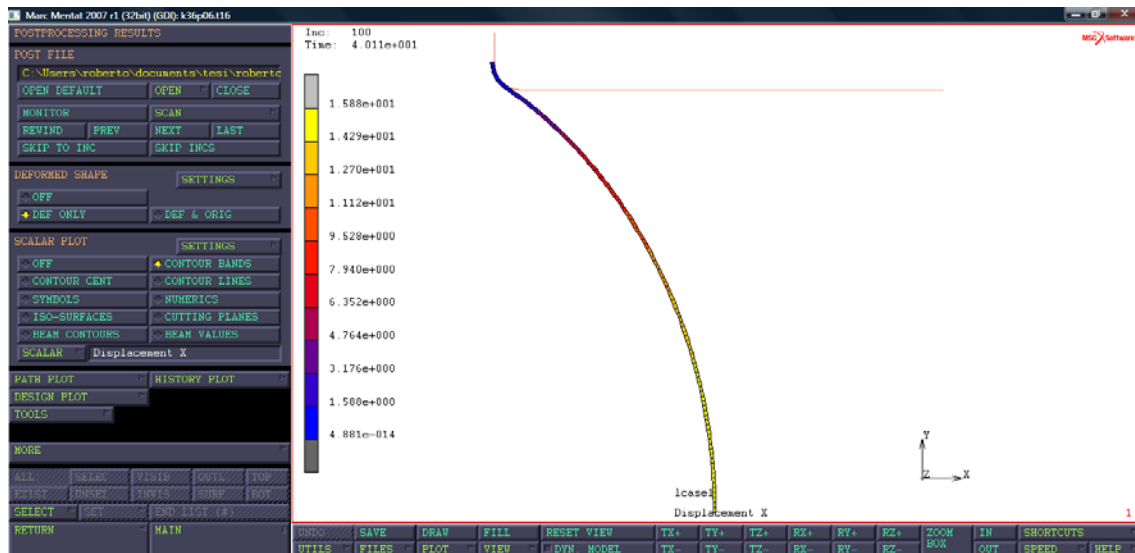


Figura 150. Desplazamiento Eje X. Incremento 100



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.2 Análisis Numérico

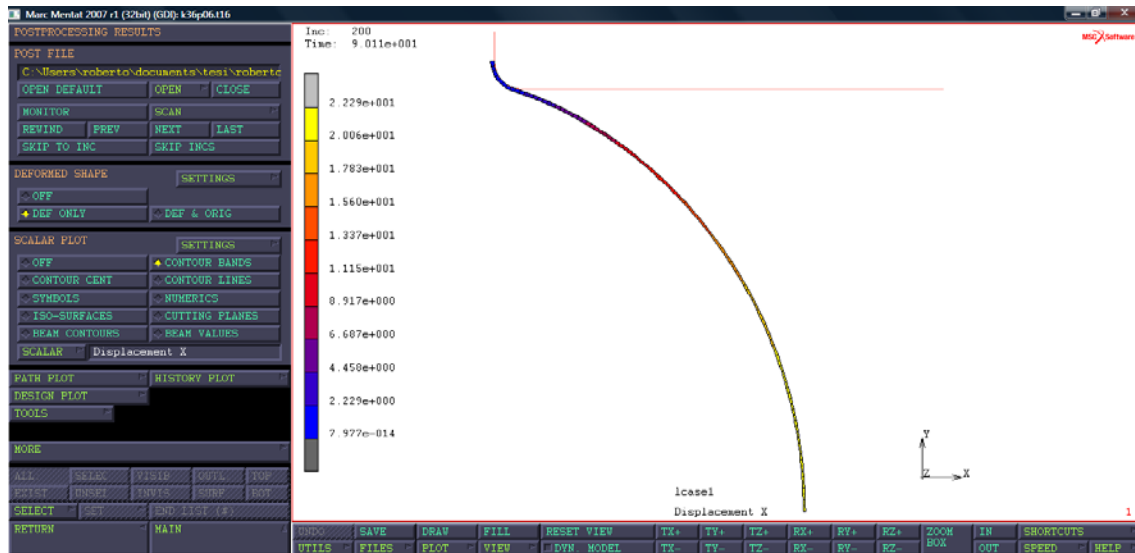


Figura 151. Desplazamiento Eje X. Incremento 200

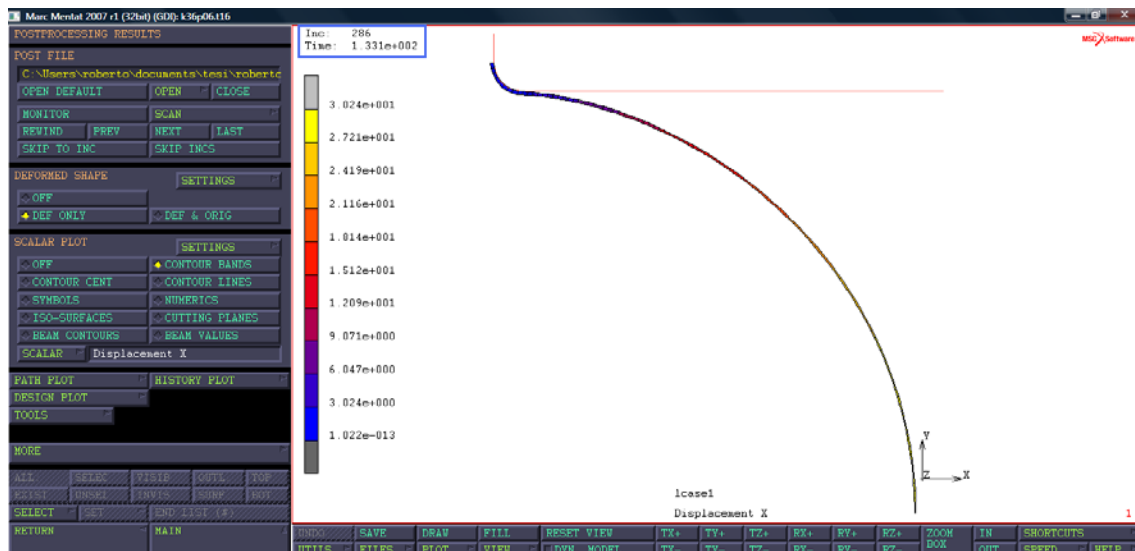


Figura 152. Desplazamiento Eje X. Incremento 286. Fin análisis

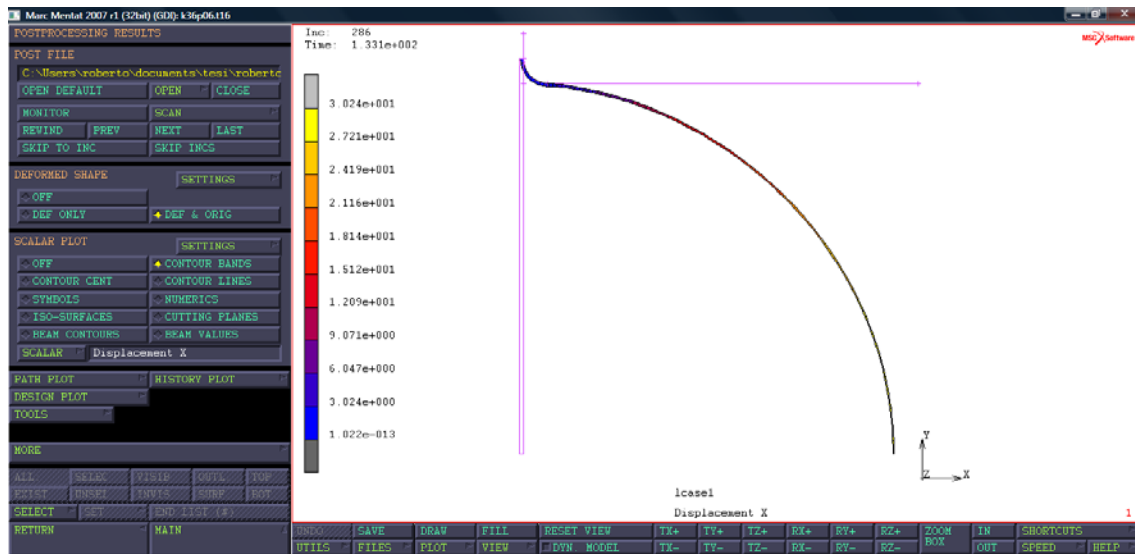


Figura 153. Desplazamiento Eje X. Deformada y original



Figura 154. Desplazamiento Eje X. Nodo en estudio

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, la prueba se lleva hasta rotura, pero el análisis se efectúa hasta $h=a=30$ mm para el nodo en estudio, como se puede observar en la **Figura 154**.

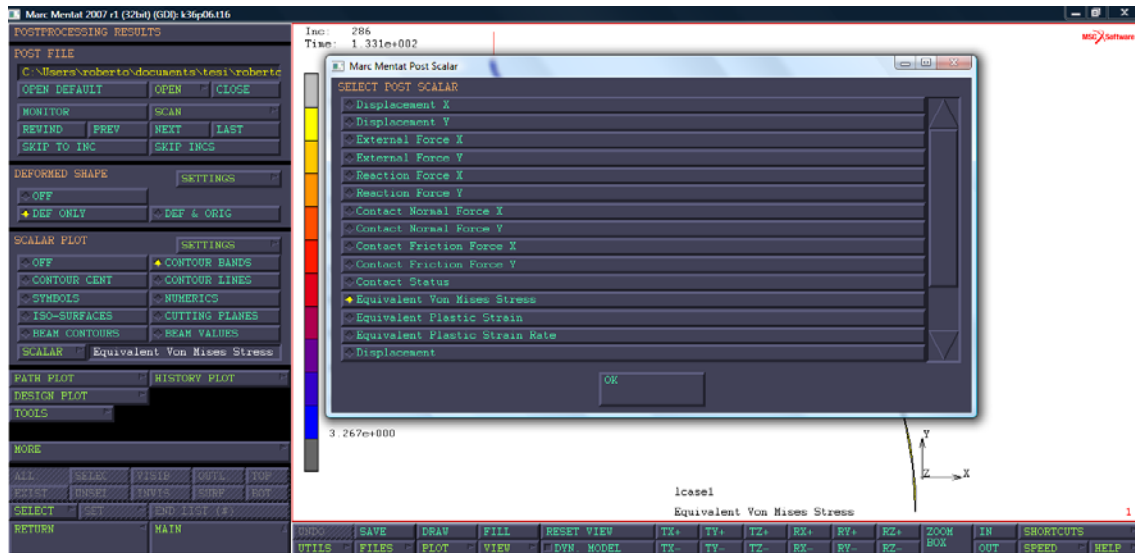


Figura 155. Selección variable a representar: Tensión Equivalente de Von Mises

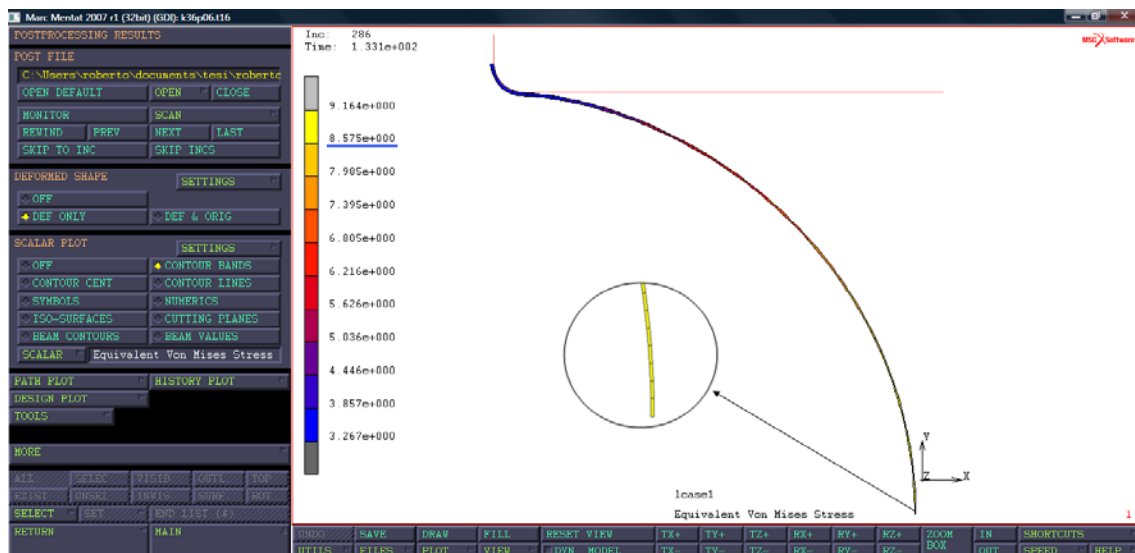


Figura 156. Tensión Equivalente de Von Mises. Zona más solicitada

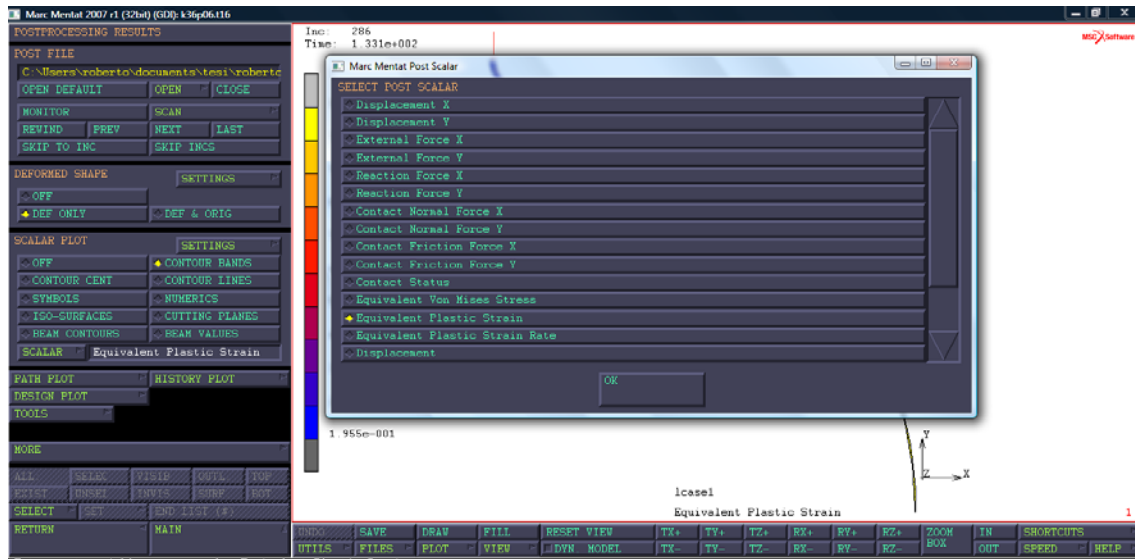


Figura 157. Selección variable a representar: Deformación plástica equivalente

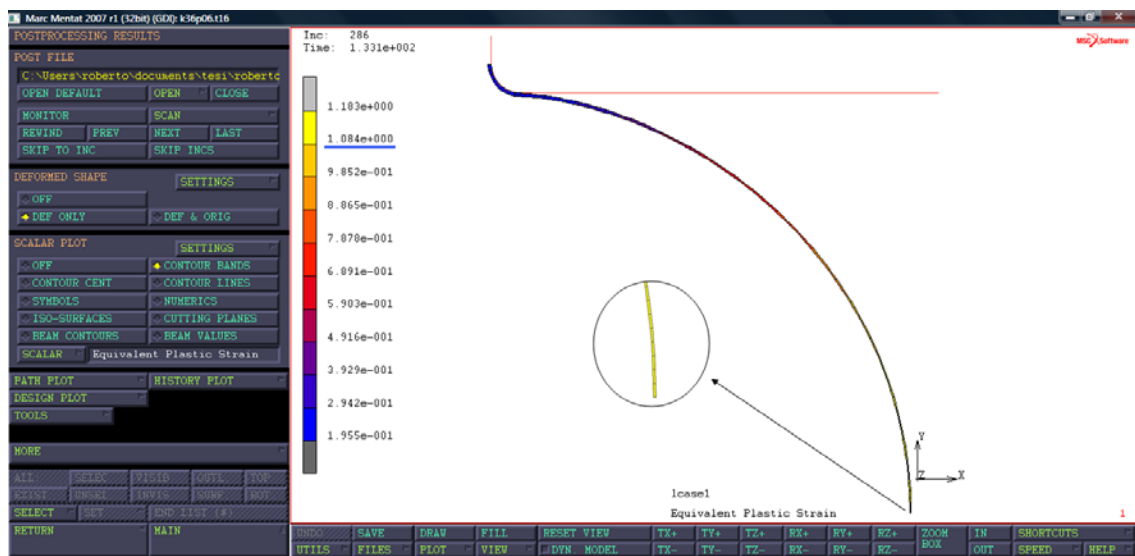


Figura 158. Deformación plástica equivalente. Zona más crítica

En la **Figura 158** se observa que la zona resaltada es la que ha sufrido una mayor deformación, y por lo tanto, donde la lámina ha experimentado un mayor adelgazamiento. Así, coincidiendo con los resultados experimentales, esta zona es la más crítica, y todas las probetas rompen, en primer lugar, en ese punto.



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.2 Análisis Numérico

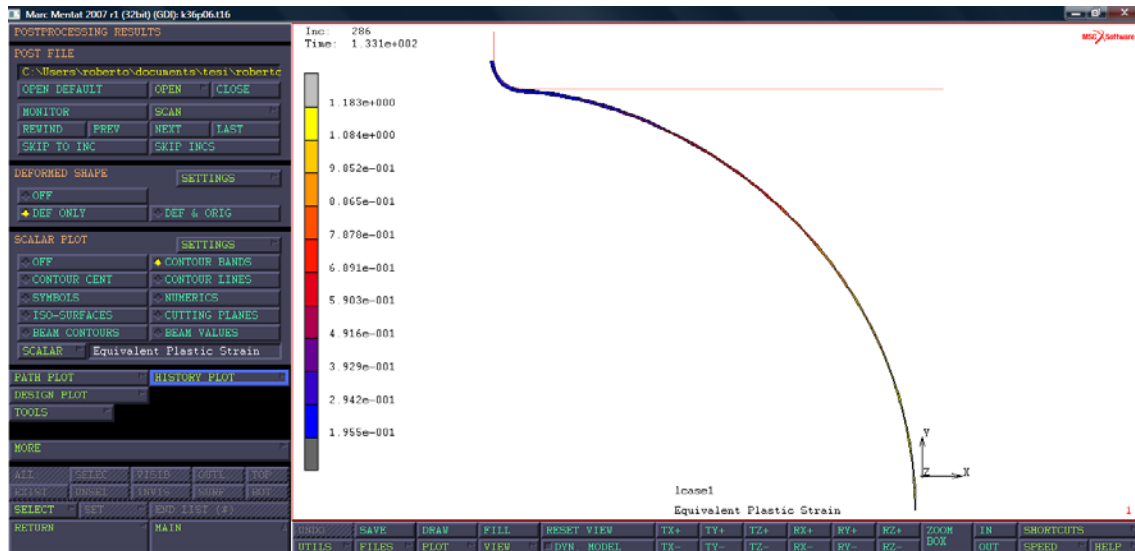


Figura 159. Diseño gráficas resultados (HISTORY PLOT)

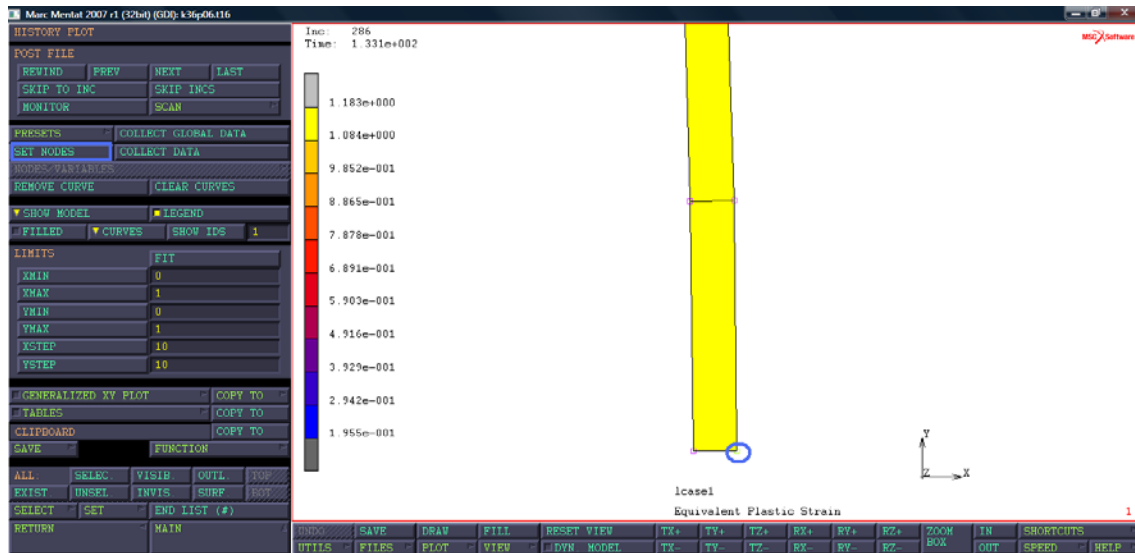


Figura 160. Selección nodo en estudio (SET NODES)

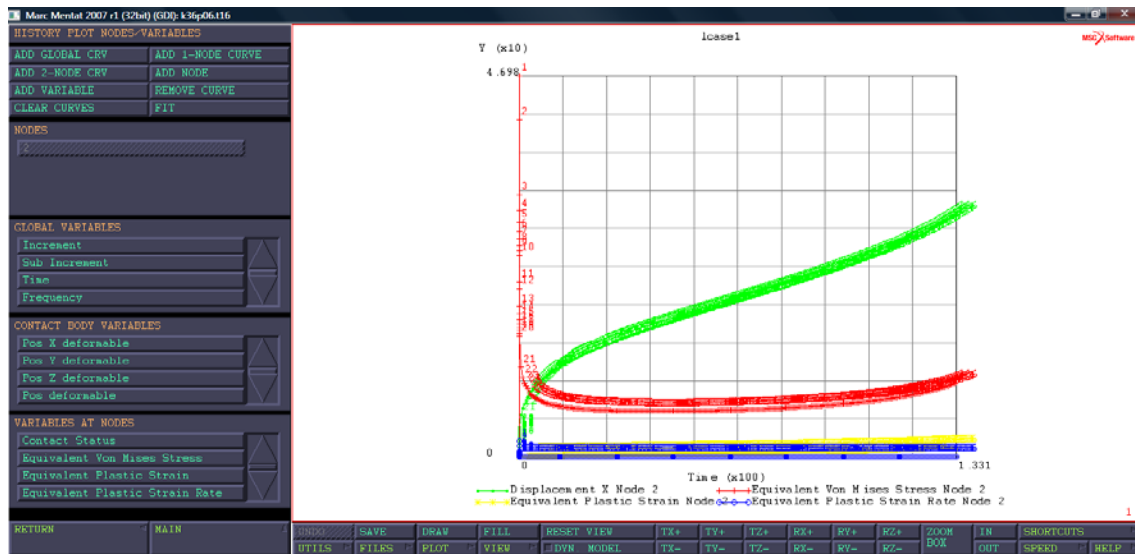


Figura 161. Gráficas resultados

En esta última **Figura 161** vemos como se representan las variables de desplazamiento, tensión de Von Mises, deformación y velocidad de deformación, respecto del tiempo. Estos datos se extraen del programa para su posterior análisis gracias al comando History Plot, para el nodo en estudio. Este nodo aparece seleccionado en la **Figura 160**, a través del comando Set Nodes.

7.2.1 Resultados

En este apartado se muestran los datos extraídos de las simulaciones realizadas con el programa de elementos finitos, MARC Mentat,

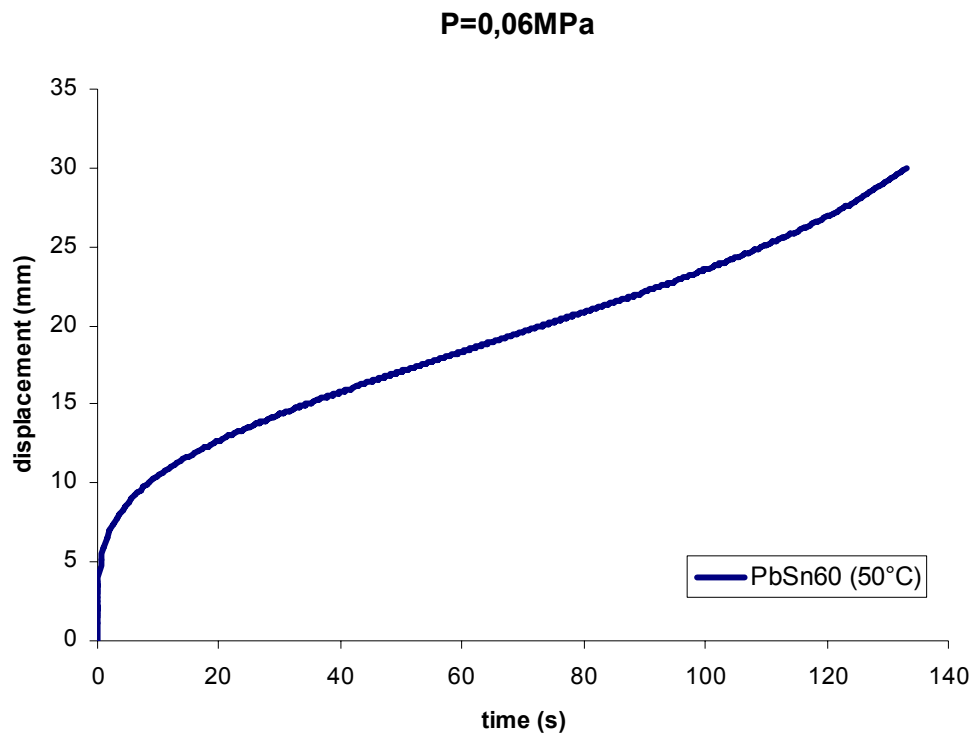


Figura 162. Simulación Numérica PbSn60 (50°C) a P=0,06MPa

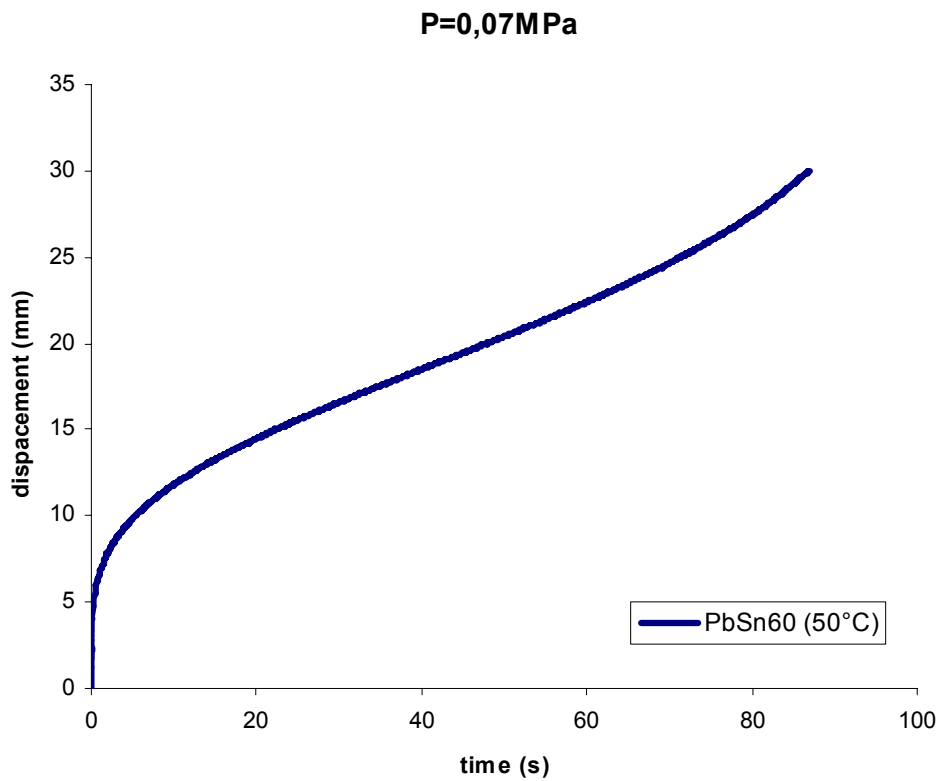


Figura 163. Simulación Numérica PbSn60 (50°C) a P=0,07MPa

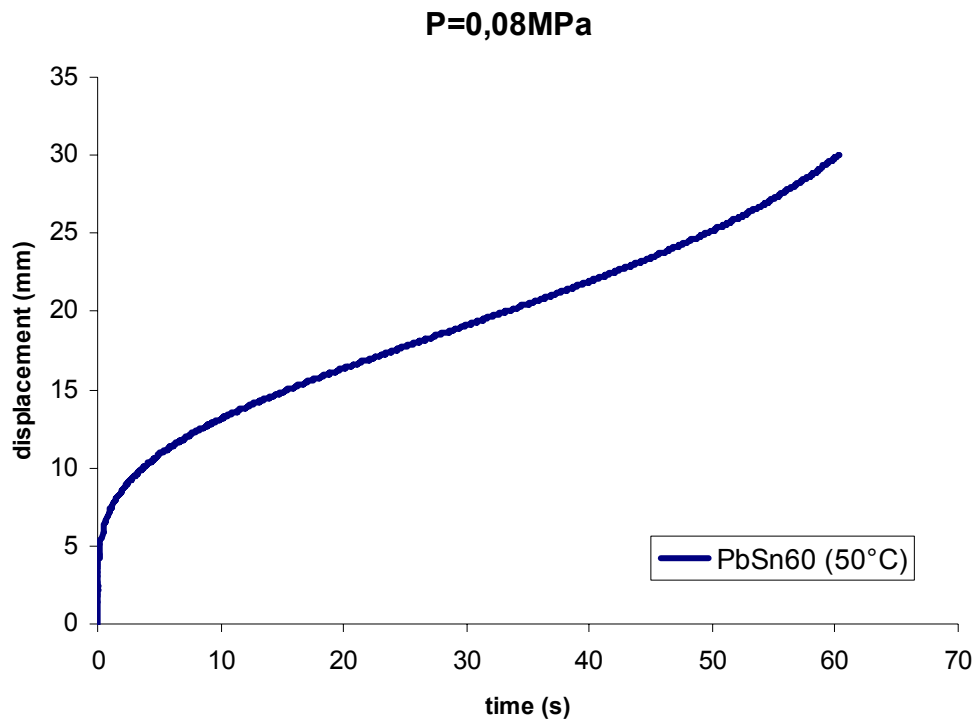


Figura 164. Simulación Numérica PbSn60 (50°C) a P=0,08MPa

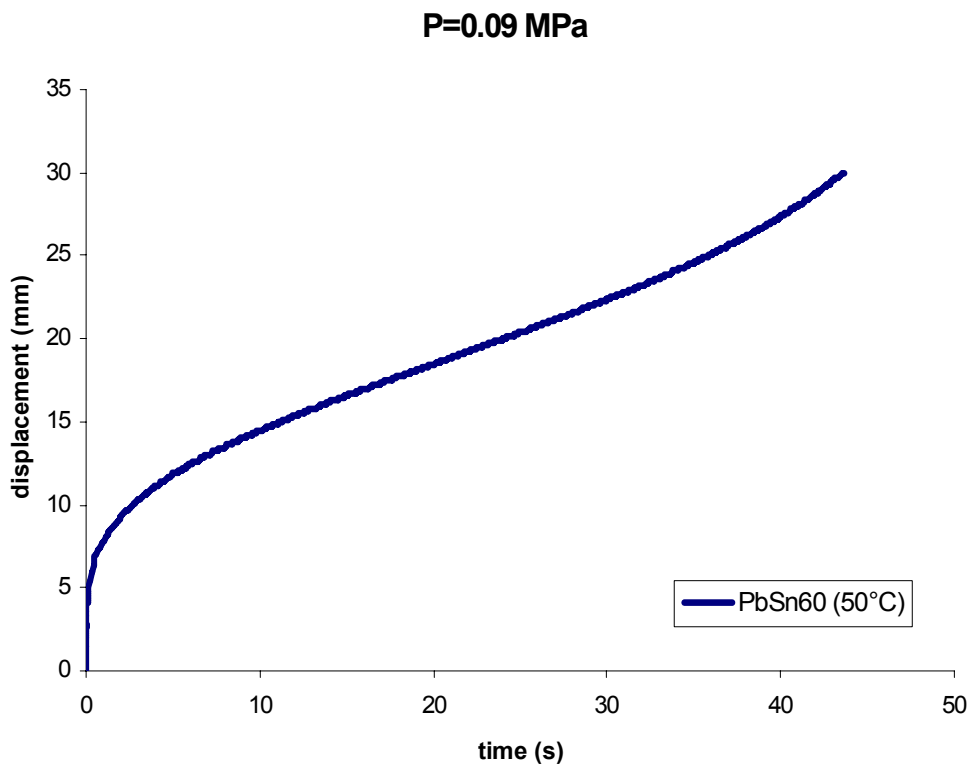


Figura 165. Simulación Numérica PbSn60 (50°C) a P=0,09MPa

P=0,1MPa

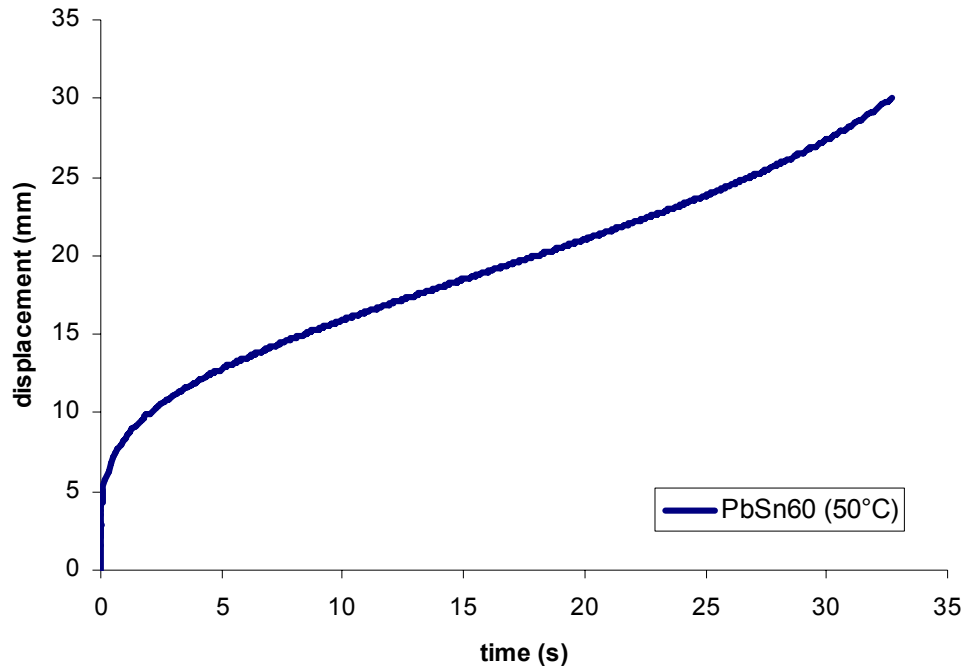


Figura 166. Simulación Numérica PbSn60 (50°C) a P=0,1MPa

A continuación se resumen los valores de los tiempos de conformado obtenidos a través de las simulaciones numéricas:

	Tiempo (s)	h (mm)
P=0,06MPa	133,110	30,027
P=0,07MPa	86,900	30,000
P=0,08MPa	60,310	30,060
P=0,09MPa	43,610	30,021
P=0,1MPa	32,710	30,072

Tabla 9. Resumen resultados Simulaciones Numéricas

Seguidamente se muestran en la **Figura 167** las simulaciones del proceso de conformado para las distintas presiones.

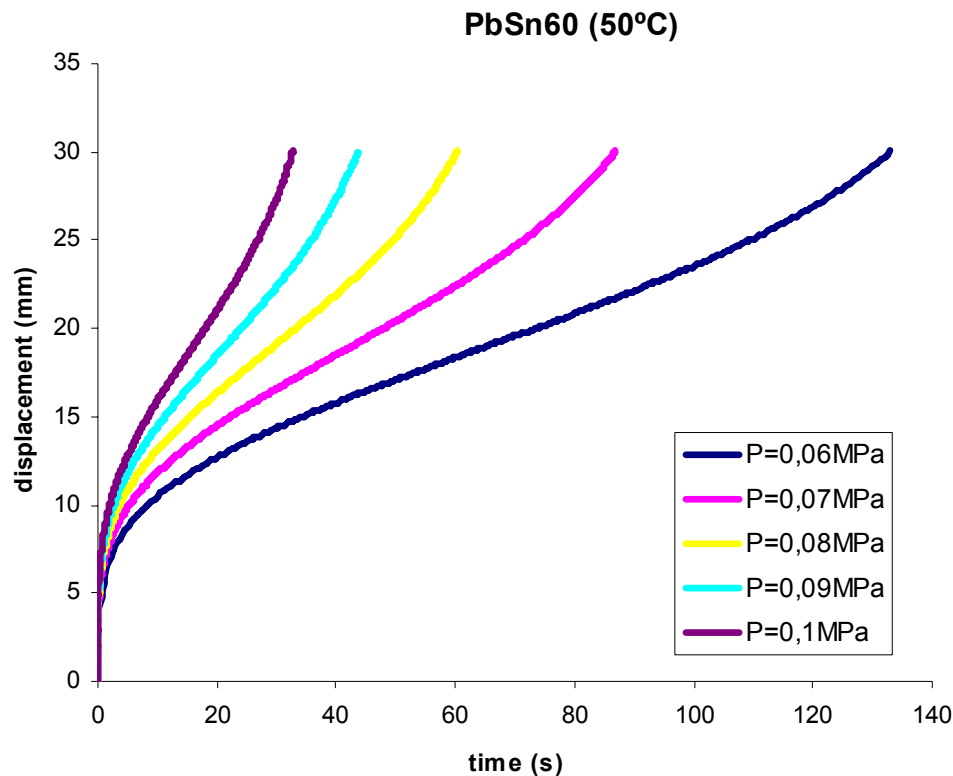


Figura 167. Curvas resultados simulaciones numéricas

Como se puede observar en la **Figura 167**, el proceso de conformado que requiere mayor tiempo corresponde al de menor presión.

Todos los ensayos alcanzan el valor de desplazamiento de 30 mm que es el que hemos impuesto.

En apartados sucesivos se verá como de ajustado es este modelo respecto a las pruebas experimentales.

7.2.1.1 Otros resultados

Además del desplazamiento (parámetro que podemos comparar con el ensayo experimental), también podemos extraer otras variables interesantes. En este caso se han decidido representar la deformación, velocidad de deformación y tensión equivalente de Von Mises.

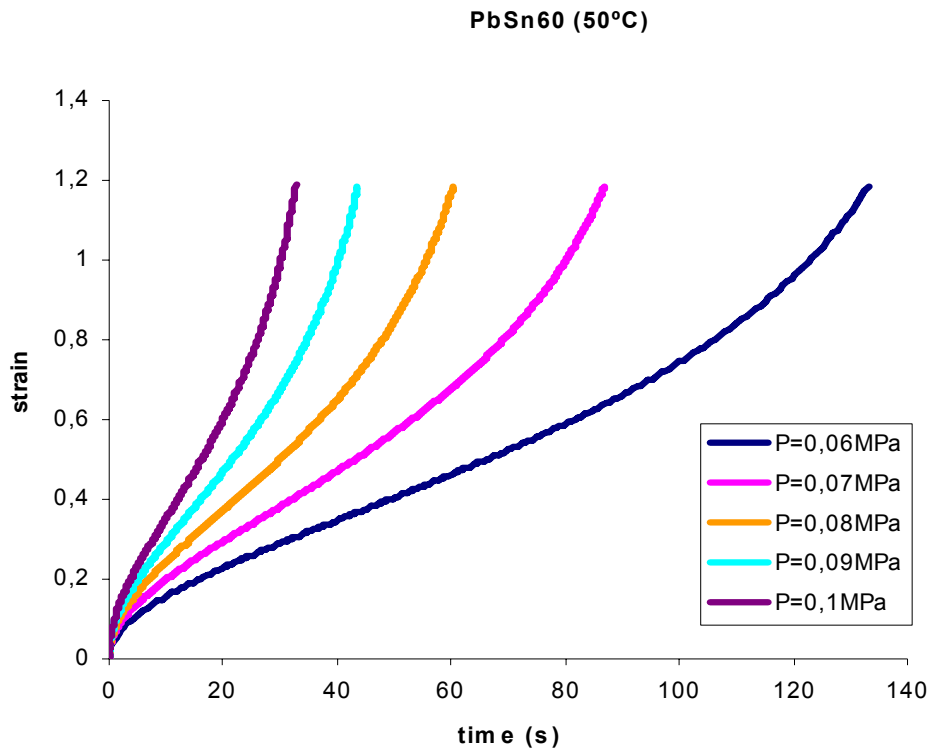


Figura 168. Curva Deformación-Tiempo (s)

De la **Figura 168** podemos destacar que los niveles de deformación alcanzados en las distintas simulaciones son iguales. La variación de espesor es función del parámetro geométrico H y del índice de sensibilidad a la velocidad de deformación, m . Así, para una misma H , y para un valor de m constante, la deformación es la misma (independientemente de la presión).

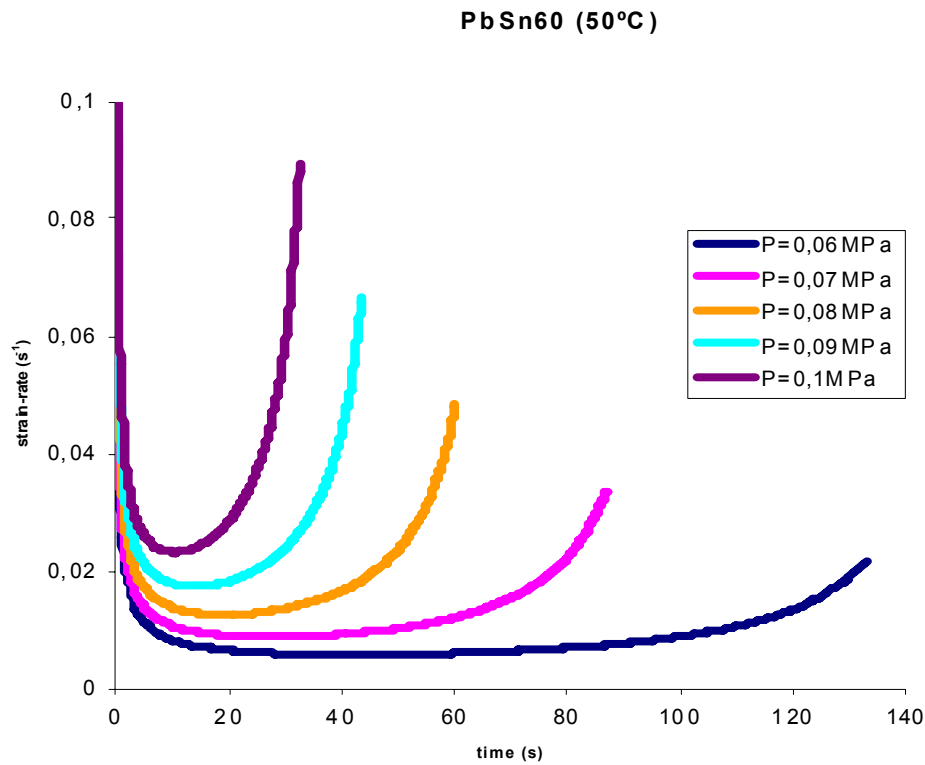


Figura 169. Curva Velocidad de deformación (s^{-1})-Tiempo (s)

En nuestro problema consideramos el valor de m constante. En las gráficas observamos como varía la velocidad de deformación en función de la presión. Podemos ver que a mayor presión, la velocidad de deformación es mayor. Así mismo, en las curvas existe una parte central donde la velocidad de deformación es relativamente constante.

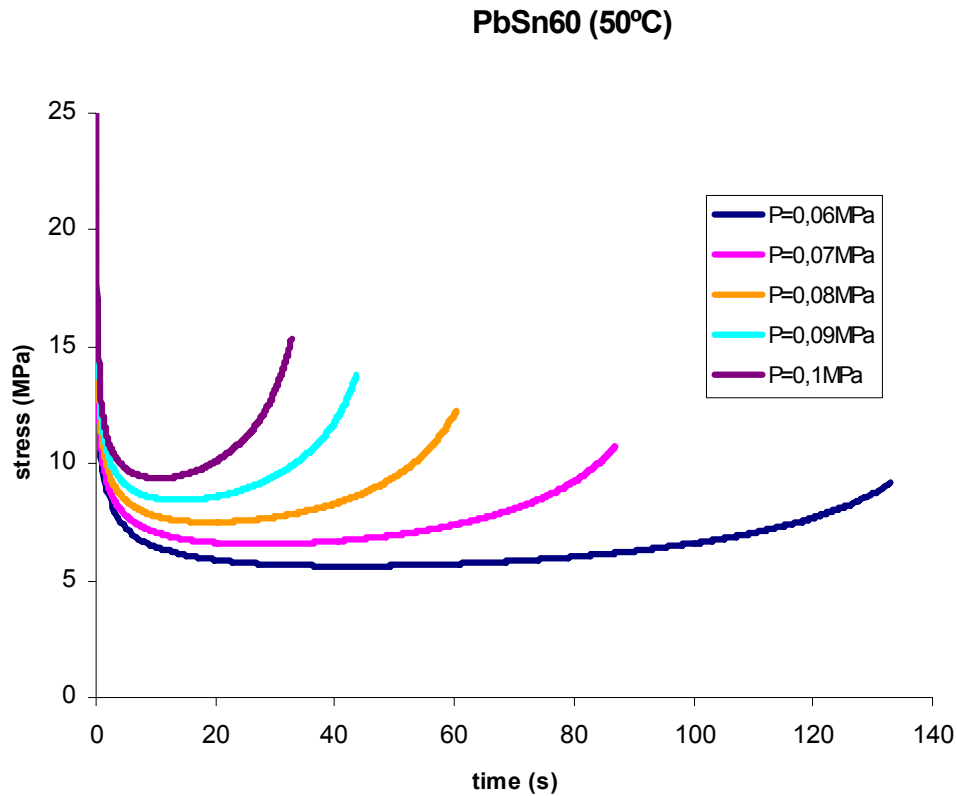


Figura 170. Curva Tensión (MPa)-Tiempo (s)

Dado que la tensión equivalente es directamente proporcional a la velocidad de deformación (Ley de Hollomon), y si asumimos que trabajamos en zonas de velocidad de deformación relativamente constantes, entonces las curvas de la tensión también tienen una zona central que tienden a un valor constante.

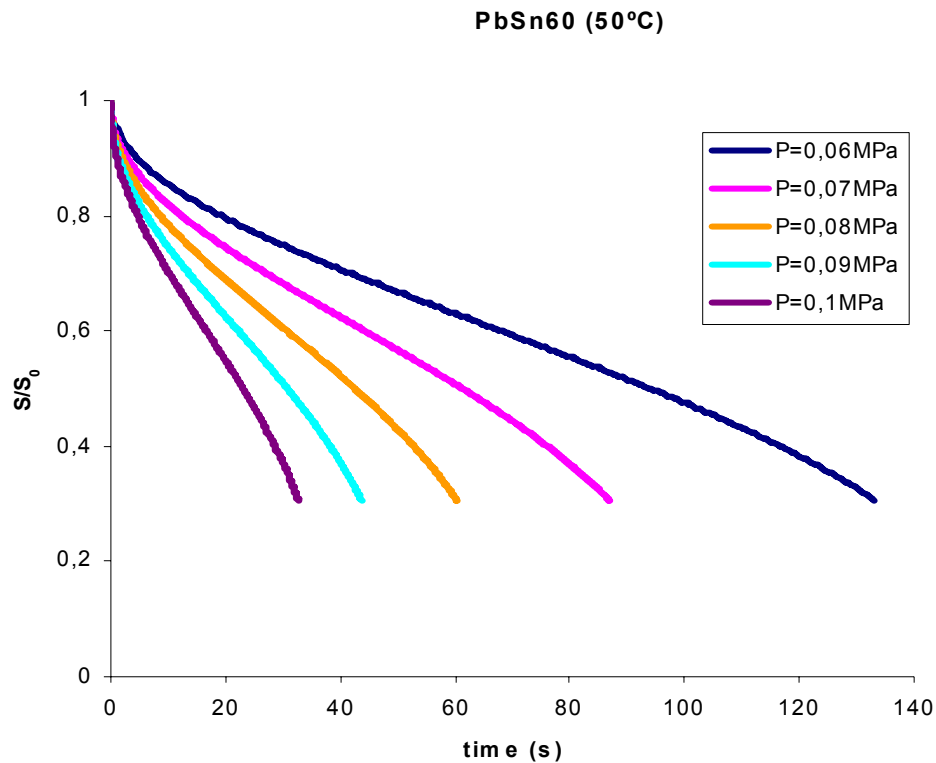


Figura 171. Curva Relación espesor instantáneo-espesor inicial-Tiempo (s)

Se puede observar que partiendo de un espesor inicial S_0 , éste se va reduciendo progresivamente durante el proceso. También se puede ver que la relación del espesor final con el inicial llega a un valor igual en todas las simulaciones.

De los estudios realizados sobre el comportamiento de los materiales superplásticos sabemos que el valor de S/S_0 está fuertemente relacionado con el valor de m . Así, dado que nosotros consideramos la m constante, siempre obtendremos los mismos valores de S/S_0 , independientemente de la presión aplicada. Las distintas presiones influirán en que dicha variación de espesor se alcanzará en mayor o menor tiempo.

7.2.2 Efecto de la geometría del molde

En el estudio que se muestra a continuación, se ha realizado una simulación de un proceso semejante a los anteriores, pero añadiendo un molde. Se analizará la variación del espesor de la lámina a lo largo de un eje para una configuración geométrica de molde habitualmente empleada en la industria.

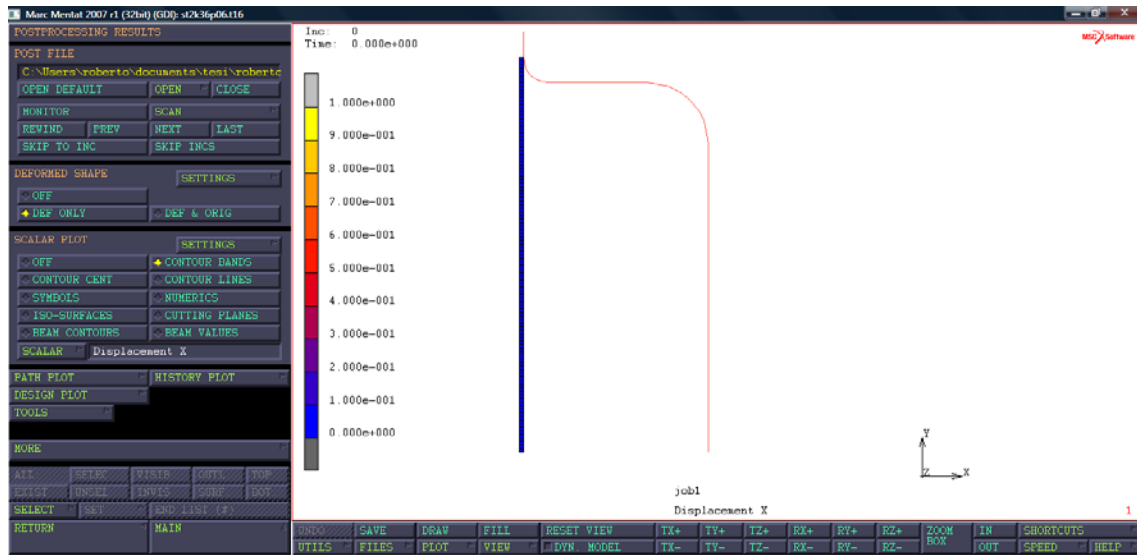


Figura 172. Archivo resultados (Post File) (Molde a $P=0.06\text{MPa}$)

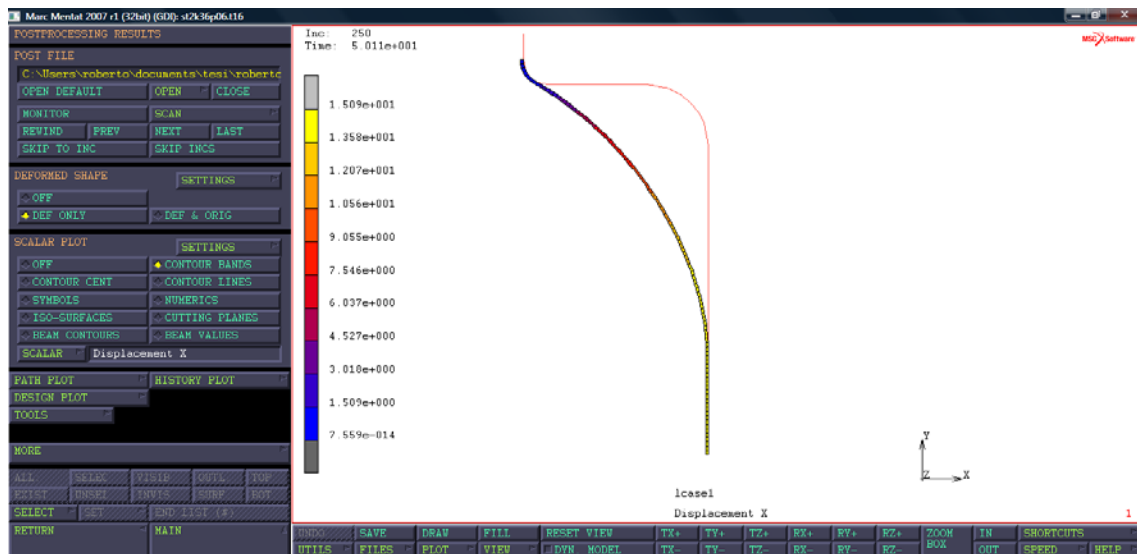


Figura 173. Desplazamiento Eje X. Incremento 250 (Molde a $P=0.06\text{MPa}$)



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.2 Análisis Numérico

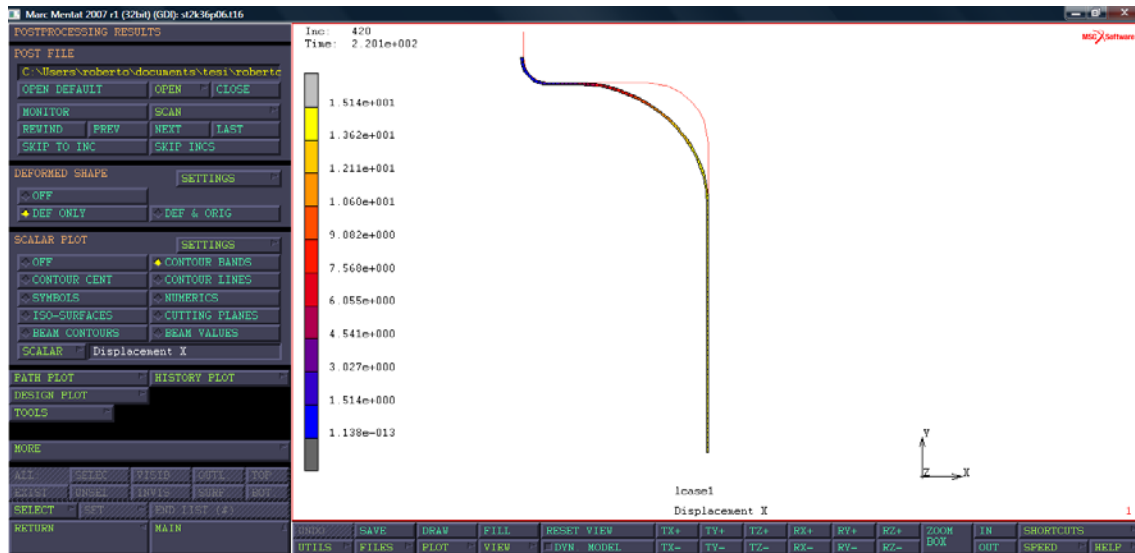


Figura 174. Desplazamiento Eje X. Incremento 420 (Molde a $P=0.06\text{MPa}$)

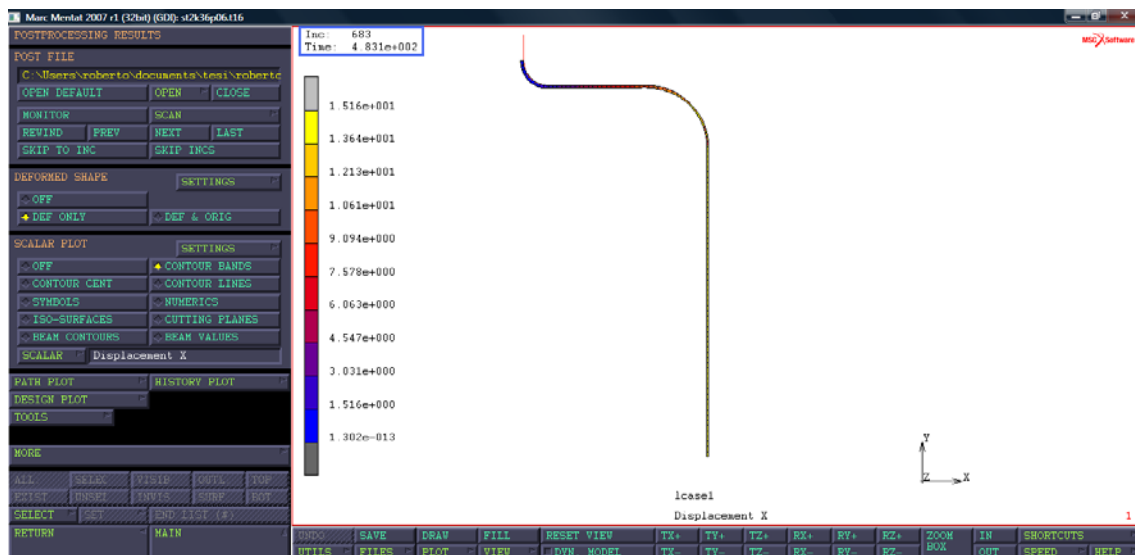


Figura 175. Desplazamiento Eje X. Incremento 683. Fin análisis (Molde a $P=0.06\text{MPa}$)

A continuación se muestra la variación del espesor a lo largo del eje del molde.

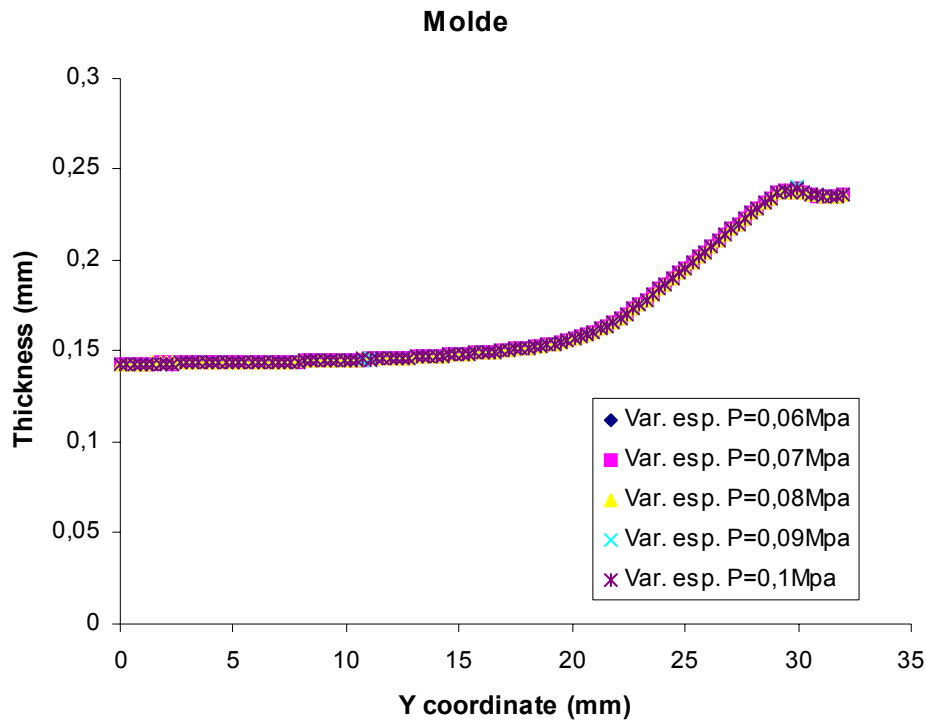


Figura 176. Curva análisis variación del espesor

Sabiendo que el espesor inicial de la lámina es de 0,3 mm, observamos el espesor final según la coordenada del eje Y. Vemos como la mayor variación de espesor tiene lugar en la coordenada cero (zona central, la más crítica), en la que la lámina sufre el mayor adelgazamiento. También se puede ver que la variación del espesor a lo largo del eje se mantiene prácticamente constante para las distintas presiones. Lo que varia es el tiempo que se tarda en alcanzar dicha variación de espesor, siendo mayores los tiempos para presiones menores.

El motivo por el cual la variación de espesor no cambia con la presión es porque el espesor es función del parámetro H y m .



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.2 *Análisis Numérico*

A continuación se muestra una tabla resumen de los tiempos de conformado (con sus respectivos incrementos), para las distintas presiones, simuladas en el molde.

	Incrementos	Tiempo (s)
P=0.06MPa	683	483
P=0.07MPa	516	316
P=0.08MPa	409	219
P=0.09MPa	369	159
P=0.1MPa	309	119

Tabla 10. Tiempos de conformado e incrementos molde

7.3 ANÁLISIS COMPARATIVO EXPERIMENTAL-NUMÉRICO

En este punto se realiza la comparación de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales frente a aquellos extraídos de las simulaciones numéricas. De este modo, podremos analizar la aproximación de nuestro modelo al caso real y la validez de la extrapolación de estos datos numéricos a otras magnitudes no evaluadas experimentalmente.

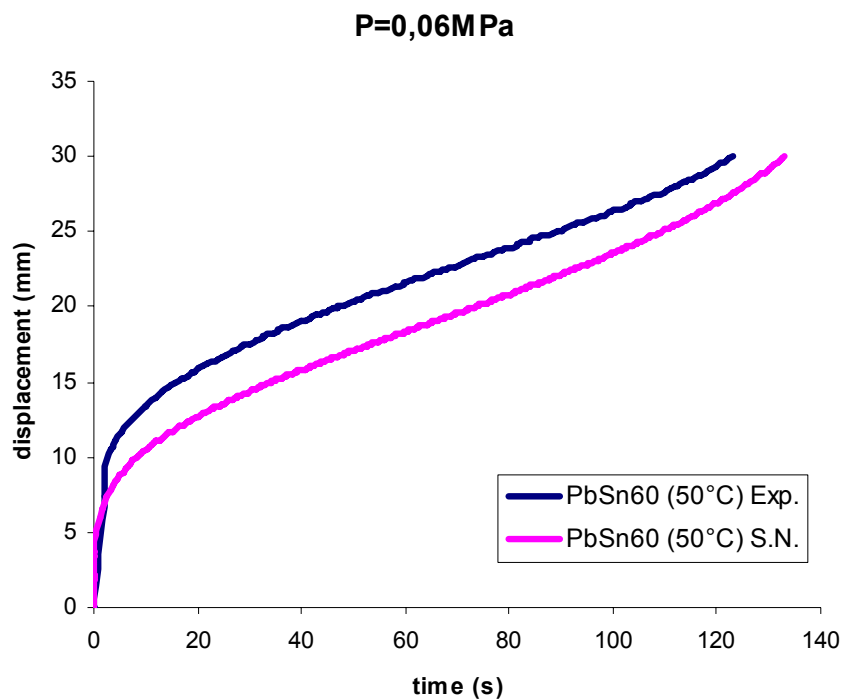


Figura 177. Curva Exp.vs.Curva S.N. P=0,06MPa



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.3 Análisis comparativo Experimental-Numérico

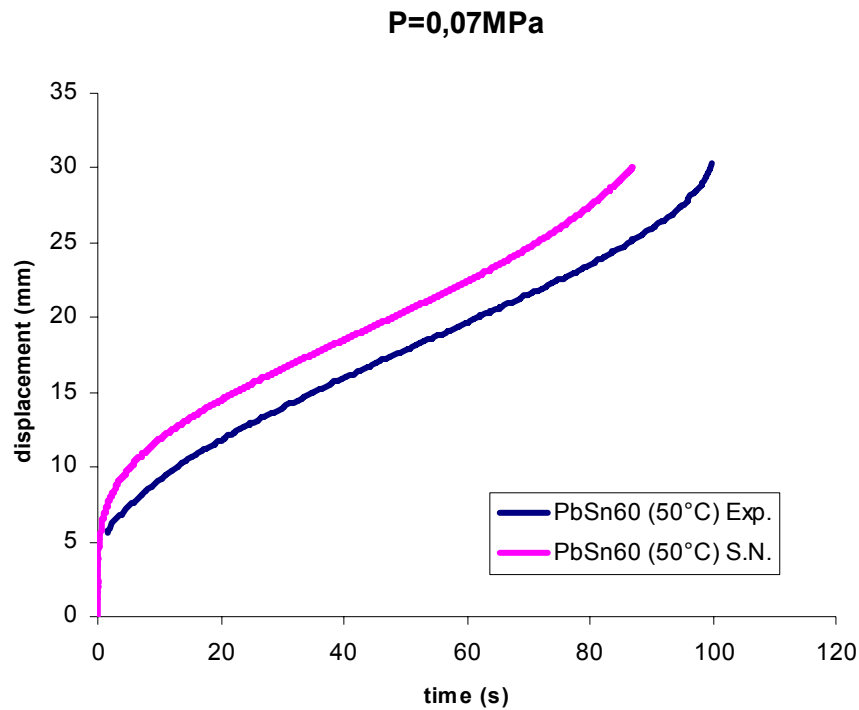


Figura 178. Curva Exp.vs.Curva S.N. P=0,07MPa

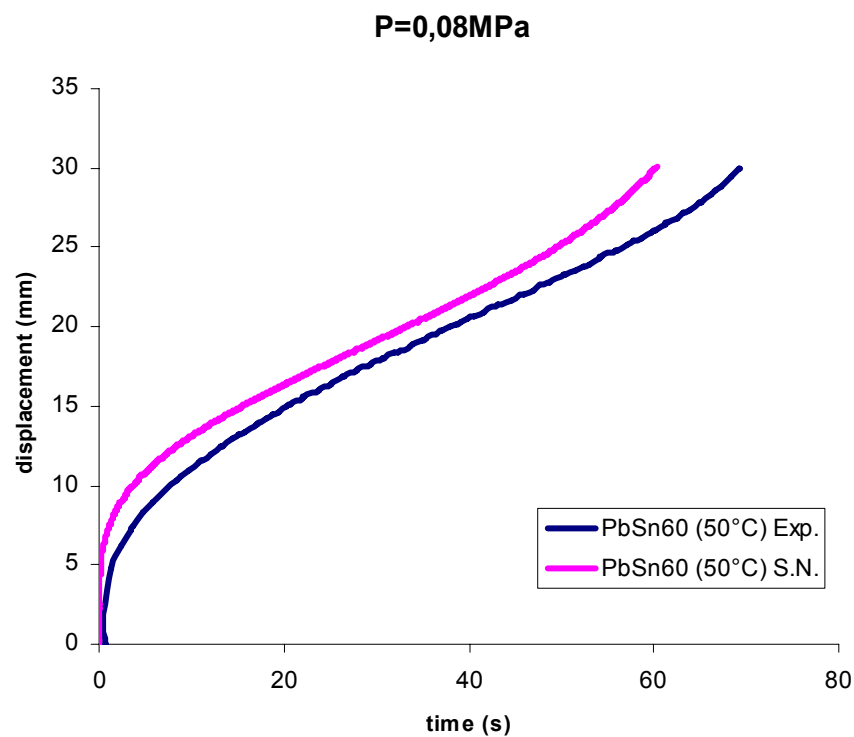


Figura 179. Curva Exp.vs.Curva S.N. P=0,08MPa



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.3 Análisis comparativo Experimental-Numérico

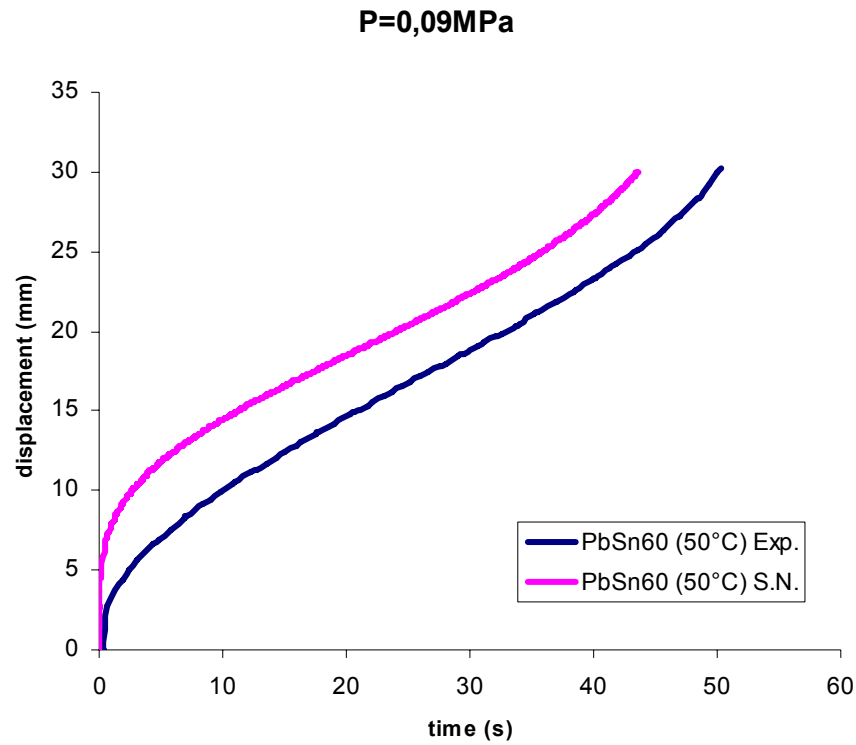


Figura 180. Curva Exp.vs.Curva S.N. P=0,09MPa

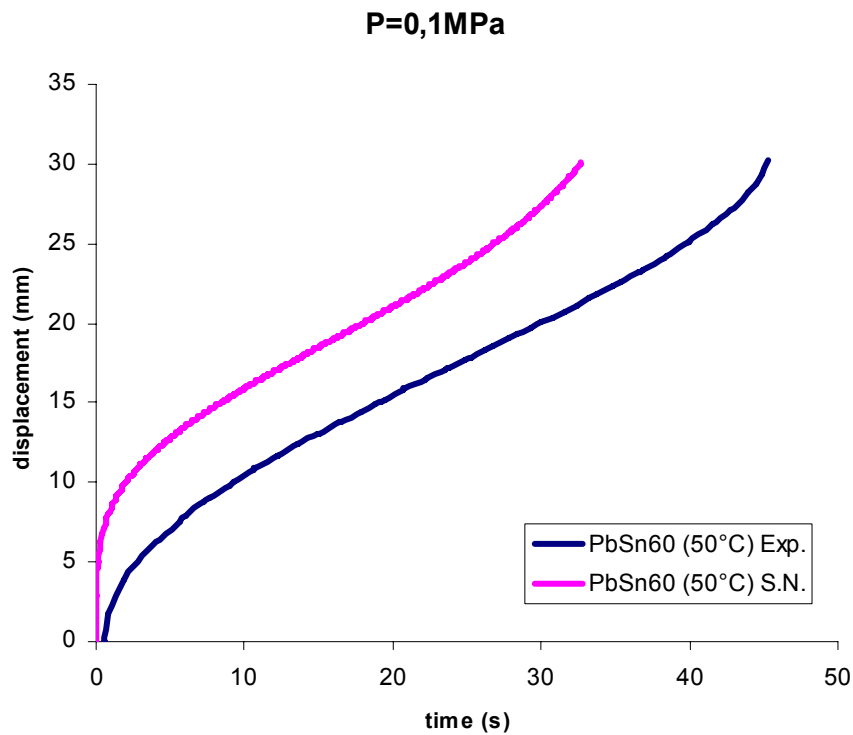


Figura 181. Curva Exp.vs.Curva S.N. P=0,1MPa



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.3 *Análisis comparativo Experimental-Numérico*

Se observa que la aproximación lograda con el modelo numérico se ajusta bien a los datos experimentales. Las pequeñas variaciones existentes entre ambas curvas se atribuyen a la ecuación base del modelo con el cual describimos el problema, la Ley de Hollomon.

En primer lugar, en el modelo analítico hemos considerado un estado de tensión biaxial equilibrado, con lo cual, tensión equivalente igual en todos los puntos de la lámina durante todo el proceso.

Por otro lado, hemos asumido válida la hipótesis de un valor m constante para el material a una cierta temperatura, independiente de la presión.

En referencia a la variación de espesor, según el modelo analítico, hemos asumido una variación del espesor constante, que es independiente del valor de K y m . En este caso, es solo dependiente del valor H .

En el caso numérico se eliminan algunas de las hipótesis del modelo analítico. En el análisis por elementos finitos, el espesor no solo es función del parámetro H , sino también de m . De los resultados obtenidos vemos que el estado de tensiones no es idéntico para todos los puntos de la lámina, ni tampoco la variación del espesor.

7.3.1 *Análisis de errores*

Si queremos analizar de manera más concreta de que orden es el error entre las simulaciones numéricas y los ensayos experimentales podemos hacerlo de dos modos distintos:

- Error absoluto. Diferencia entre el valor medido y el valor tomado como exacto. Puede ser positivo o negativo, según si la medida es superior al valor real o inferior (la resta sale positiva o negativa). Su unidad es la misma que la de la medida.
- Error relativo. Es el cociente (la división) entre el error absoluto y el valor exacto. Si se multiplica por 100 se obtiene el tanto por ciento (%) de error. Al



7. ESTUDIO SUPERPLÁSTICO DE LA ALEACIÓN PBSN60

7.3 Análisis comparativo Experimental-Numérico

igual que el error absoluto puede ser positivo o negativo (según lo sea el error absoluto) porque puede ser por exceso o por defecto. no tiene unidades.

Por ello, y según los valores obtenidos, podemos calcular los siguientes errores relativos:

	EXPERIMENTAL	S.N.	
	Tiempo (s)	Tiempo (s)	ERROR (%)
P=0,06MPa	122,95	133,11	-8,263521757
P=0,07MPa	99,73	86,9	12,86473478
P=0,08MPa	69,19	60,31	12,8342246
P=0,09MPa	50,29	43,61	13,28295884
P=0,1MPa	45,33	32,71	27,84028237

Tabla 11. Análisis de errores

Los errores de precisión entre el modelo experimental y el numérico son atribuibles principalmente a dos motivos:

1. Falta de precisión en la medida de los espesores de las láminas. Esto es debido a que esta aleación es un material muy blando, y con la sola aplicación del calibre para la medición del espesor, ésta experimenta una pequeña deformación.
2. Discrepancias entre las hipótesis del modelo experimental y el numérico. Las diferencias son las siguientes:
 - *Modelo analítico*: se considera variación de espesores constante y tensión biaxial equilibrada e igual para todos los puntos de la lámina.
 - *Modelo numérico*: variación de espesores desigual y tensión variable.

8. CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo el objetivo principal del estudio habiendo caracterizado el material a nivel experimental y desarrollado un modelo numérico que representa dicho comportamiento fielmente.

Durante la realización del proyecto se han adquirido las destrezas técnicas para llevar a cabo un proceso de conformado superplástico de materiales. Además, se han estudiado las posibilidades que ofrece el software de elementos finitos MARC Mentat para modelizar este tipo de procesos, aprendiendo a usar dicho programa.

Los materiales superplásticos claramente ofrecen una gran ventaja respecto a los materiales plásticos tradicionales, pues alcanzan valores de deformación mucho más elevados. Sin embargo, para que su uso pueda extenderse comercialmente se han de superar las dificultades que suponen el uso de bajas velocidades de deformación (tiempos de conformado muy largos) y elevadas temperaturas (equipos especiales y costes). Por otro lado, es necesario asumir la elevada reducción de espesor que ocurrirá siempre a las piezas conformadas mediante este tipo de procesos.

La gran ventaja de los procesos de SPF es que se consigue una pieza en una sola operación, con las consecuentes mejoras que ello supone en las propiedades mecánicas finales.

Tras haber realizado una comparación entre el modelo experimental y el modelo numérico se ha visto que existe un error relativo bastante pequeño, esperable. Este se puede atribuir a errores derivados principalmente de la parte experimental (temperatura del proceso, presión aplicada, medición del espesor, etc.). Además, el modelo analítico es una aproximación muy buena del proceso real, pero con ciertas limitaciones. La hipótesis de variación de espesor constante en realidad no coincidiría con el comportamiento real. Además, consideramos un estado de tensión biaxial equilibrado donde la tensión equivalente es la misma en todos los puntos de la lámina. Realizando la simulación por elementos finitos nos damos cuenta de que, efectivamente no es así, sino que la tensión varía en la realidad.

Por otro lado, la hipótesis de m constante para un proceso a presión constante sería válida para el caso de velocidades de deformación muy bajas y constantes durante todo el proceso. Esto se cumple para casi todo el análisis.

El empleo de este tipo de materiales encuentra aplicación sobre todo en el sector aeronáutico, debido a los elevados costes de las aleaciones y de los equipos necesarios para conformarlas.

En referencia al material estudiado, PbSn60, éste se trata de un material muy práctico a la hora de trabajar con él, debido a que se comporta como un material superplástico a bajas temperaturas. Sin embargo, su utilización industrial carece de interés, puesto que es un material muy blando, con unas propiedades mecánicas limitadas. De cualquier modo, a nivel académico es muy útil puesto que nos ayuda a comprender el comportamiento de este tipo de materiales. Gracias a su bajo coste y su facilidad de conformado (a temperaturas bajas) no requiere equipos muy costosos.

Mejoras, propuestas para el futuro

Para trabajos futuros se propone mejorar la ecuación que define el modelo. Se trataría de desarrollar una ecuación más compleja y precisa que caracterice el problema de manera más profunda. Esto se puede conseguir introduciendo el parámetro del índice de endurecimiento “ n ” en la ley de Hollomon, de manera que la ecuación quedaría:

$$\sigma = K \cdot \bar{\epsilon}^{-n} \cdot \dot{\epsilon}^m$$

Además, en lugar de considerar el parámetro m constante, si se calcula su variación según la velocidad de deformación, los resultados que arrojaría la Ley anterior serían más exactos. Esto se puede lograr a través de la realización de una serie de ensayos de tracción.

De cualquier modo, los resultados obtenidos en este estudio se consideran válidos con la ecuación $\sigma = K \cdot \dot{\epsilon}^m$ y las simplificaciones usadas, puesto que los errores no son muy elevados.



Uno de los problemas más importantes de este proceso es la cavitación. Una forma de paliar este tipo de fallo es el uso del concepto de *"back pressure"*, que impone una presión hidrostática en la lámina durante el conformado. En definitiva consiste en aplicar una presión que se oponga a la presión de conformado, y sostener esta presión a lo largo del ciclo de procesado. Si esta presión es del orden de la tensión de fluencia, la cavitación se puede reducir, o suprimir completamente.



9. BIBLIOGRAFIA

Giuliano.G; Carrino.L; Napolitano.G: "Numerical simulation of the SPF process for titanium alloys" Materials Technology (incorporating Advanced Performance Materials) 18, (2003) p.461-484.

R.R. Boyer: An overview on the use of titanium in the aerospace industry, Material Science and Engineering A213 (1996) 103-114.

N. Chandra: "Constitutive behaviour of superplastic materials" International Journal of Non-Linear Mechanics, 37 (2002) 461-484.

S.B. Yi, S. Zaefferer, H. G. Brokmeier: "Mechanical behaviour and microstructural evolution of magnesium alloy AZ31 in tension at different temperatures", Materials Science and Engineering A 424 (2006) 275-281

Yong,H.Kim; S.,S.Hong; J.,S.Lee; Wagoner,R.H.: "Analysis of superplastic forming processes using a finite-element method" Journal of Materials Processing Technology 62,1-3,1996,p.90-99

Giuliano.G; Carrino.L; Napolitano.G: "A posteriori optimisation of the forming pressure in superplastic forming processes by the finite element method" Finite Elements in Analysis and Design 39, 11, 2003, p.1083-1093

Giuliano.G;Carrino.L:"Finite element modelling and the experimental verification of superplastic forming" Advanced Performance Materials 6,2,1999,p.159-169

Giuliano.G;Carrino.L:"Modelling of superplastic blow forming" International Journal of Mechanical Sciences 39,2,1997,p.193-199

Shyong, Lee: "Thickness distribution in a superplastically formed rectangular pan under plane-strain conditions" Journal of Materials Processing Technology 65,1-3,1997,p.59-64



Xing,H.L;Wang,Z.R: "Finite-element analysis and design of thin sheet superplastic forming"

Journal of Materials Processing Technology 68,1,1997,p.1-7

Kim,Yong H; Lee,Jung-Min; Hong, S.S: "Optimal design of superplastic forming processes"

Journal of Materials Processing Technology 112,2-3,2001 p.166-173

Xun,Yuwey;Zhun Yiyuan; Mao,Wenfeng; Cui,Jainzhong: "Superplastic forming technology of aircraft structures for Al-Li alloy and high-strength Al alloy" Journal of Materials Processing Technology 72, 2,1997,p.183-187

Akkus, Nihat; Manabe, Ken-ichi; Kawahara, Masanori; Nishimura, Hisashi: "A finite-element model for the superplastic bulging deformation of Ti-alloy pipe" Journal of Materials Processing Technology 68,3,1997,p.215-220

Giuliano, G: "Simulation of instability during superplastic deformation using finite element method" Materials and Design 26, 4, 2005, p. 373-376

A.K.Ghosh and C.H. Hamilton: "Process Modeling, Fundamentals and Applications to Metals", ASM, Metals Park, OH, 1979, 303

Cleveland,R.M.; Chosh,A.K.; Bradley, J.R.: "Comparison of superplastic behavior in two 5083 aluminum alloys" Materials Science and Engineering: A 351, 1-2,2003, p.228-236

Giuliano,G; Carrino,L.; Ucciardello,N: "Thermomechanical stress analysis of superplastic forming tools" Journal of Materials Processing Technology 155-156, 2004, p.1273-1279



Lee,K.S; Huh,H:"Numerical simulation of the superplastic moving die forming process with a modified membrane finite element method" Journal of Materials Processing Technology 113,1-3,2001,p.754-760

Lin,J; Ball, A.A; Zheng, J.J:"Surface modelling and mesh generation for simulating superplastic forming" Journal of Materials Processing technology 80-81, 1998, p. 613-619

Huang,A; Lowe,A; Cardew-Hall, M.J:"Experimental validation of sheet thickness optimisation for superplastic forming of engineering structures" Journal of Materials Processing Technology 112, 1, 2001, p.136-143